

控制与决策

Control and Decision

竞争视角下考虑技术创新的逆向供应链微分博弈

王道平, 张可, 周玉

引用本文:

王道平, 张可, 周玉. 竞争视角下考虑技术创新的逆向供应链微分博弈[J]. *控制与决策*, 2023, 38(9): 2653–2662.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2022.0535>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[信息非对称下考虑制造商回收行为的闭环供应链协调](#)

Coordination of closed supply chain under asymmetric information considering manufacturer's recycling behavior

控制与决策. 2021, 36(7): 1723–1731 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1657>

[不同担保模式下考虑零售商公平关切的闭环供应链博弈模型](#)

Game models of closed-loop supply chain under different warranty modes considering retailer's fairness concerns

控制与决策. 2021, 36(6): 1489–1498 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1328>

[政府补贴和增值税退税政策的闭环供应链决策](#)

Closed-loop supply chain decisions under government subsidies and VAT rebates

控制与决策. 2021, 36(11): 2771–2782 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0356>

[考虑成员企业风险态度的制造商资金约束闭环供应链定价与回收决策](#)

Pricing and recycling decisions of a closed-loop supply chain considering participators' risk attitudes and manufacturer capital constraint

控制与决策. 2021, 36(5): 1239–1248 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1305>

[风险规避制造商市场入侵策略](#)

Market encroachment strategy of risk-averse manufacturer

控制与决策. 2021, 36(10): 2528–2536 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1819>

竞争视角下考虑技术创新的逆向供应链微分博弈

王道平[†], 张可, 周玉

(北京科技大学 经济管理学院, 北京 100083)

摘要: 针对由再制造商、线上线下竞争回收商和消费者组成的逆向供应链, 考虑技术创新研究竞争背景下逆向供应链的微分博弈问题. 利用伊藤过程刻画再制造技术先进度的随机演化过程, 基于成员的利润结构, 构建逆向供应链的随机微分博弈模型. 运用贝尔曼连续型动态规划理论, 求解动态和稳定均衡状态下成员的反馈策略, 揭示再制造技术先进度的动态随机演化特征. 最后结合算例, 分析两种均衡状态下, 回收商的竞争程度和消费者对直接回收价格的敏感系数对各成员均衡策略以及利润的影响. 研究表明: 提高再制造技术先进度可降低直接回收价格和转移回收价格; 由于随机干扰因素的影响, 再制造技术先进度始终围绕其期望上下波动, 最终稳定于一个稳态值; 回收商的竞争有利于激励再制造商投入更多的技术创新努力以提高再制造技术先进度, 进而提高电子废弃物的整体可再制造率, 但会降低回收商的单位获利, 并且过度的竞争不利于电子废弃物的回收.

关键词: 逆向供应链; 竞争回收; 微分博弈; 技术创新; 伊藤过程; 电子废弃物

中图分类号: F270

文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2022.0535

引用格式: 王道平, 张可, 周玉. 竞争视角下考虑技术创新的逆向供应链微分博弈 [J]. 控制与决策, 2023, 38(9): 2653-2662.

Differential game of reverse supply chain considering technological innovation under perspective of competition

WANG Dao-ping[†], ZHANG Ke, ZHOU Yu

(School of Economics and Management, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: Considering a reverse supply chain composed of a remanufacturer, on-line and off-line competitive recyclers and consumers, this paper studies the differential game problem of reverse supply chain under the background of competition. The stochastic evolution process of advanced remanufacturing technology is described by using its process. Based on the profit structure of members, the stochastic differential game model of reverse supply chain is constructed. By using Bellman's continuous dynamic programming theory, the members' feedback strategies under dynamic and stable equilibrium states are solved, and the dynamic stochastic evolution characteristics of advanced remanufacturing technology are revealed. Finally, an example is given to illustrate the influence of the competitive degree of online and offline recyclers and the price sensitivity coefficient of consumer recycling on the member equilibrium strategy and profit under two equilibrium conditions. The results show that increasing the advanced remanufacturing technology can effectively reduce the direct recovery price and transfer recovery price. Due to the influence of random disturbance, the advanced level of remanufacturing technology always fluctuates up and down around its expectation, and finally stabilizes to a steady-state value with time. Competition between online and offline recyclers can encourage remanufacturers to invest more in innovation efforts to improve the overall remanufacturing rate of the electronic waste, but it will reduce the Recycler's unit profit level, and excessive competition is not conducive to electronic waste recycling.

Keywords: reverse supply chain; competitive recycling; differential game; technology innovation; its process; electronic waste

收稿日期: 2022-04-22; 录用日期: 2022-09-20.

基金项目: 国家自然科学基金项目(71871017).

责任编辑: 霍宝锋.

[†]通讯作者. E-mail: dpwang@ustb.edu.cn.

*本文附带电子附录文件, 可登录本刊官网该文“资源附件”区自行下载阅览.

0 引言

目前,科技的进步导致电子产品更新换代的周期日益缩短,产生的电子废弃物与日俱增.根据国家环境保护部统计,我国电子废弃物年产量将由2020年的200万吨增加到2040年的2000万吨^[1].然而,巨量的电子废弃物却得不到有效的回收处理,2020年全世界产生的5360万吨电子废弃物中被回收利用的只有不到1/5,大量的高价值、可回收材料被浪费,处理不当的电子废弃物将严重影响生态环境,回收再制造成为亟待优化的课题.

随着科学技术的迅猛发展,“互联网+”回收模式^[2]逐渐成为一种新业态.很多再制造商不仅有线下回收渠道,还会委托线上回收商进行回收.在逆向供应链中,回收商以直接回收价格从消费者手中回收电子废弃物,再制造商再以转移回收价格从回收商手中进行二次回收.在这个过程中,不同回收渠道在回收同质产品时势必会产生竞争.本文假定两回收商之间的竞争为价格竞争,两者之间除了价格不同外,回收量也不同.此外,再制造技术水平对电子废弃物的再制造起着至关重要的作用,再制造即通过技术创新使产品在性能和质量上达到甚至超过原有值^[3],再制造生产也已经作为一种生态理念被越来越多的企业关注采用^[4].

鉴于此,本文研究再制造技术先进度以及线上线回收商竞争对成员定价和收益的影响,并在此基础上揭示再制造技术先进度的动态演化规律,为提高制造企业环保和经济效益提供理论支撑和参考依据.

在供应链成员竞争研究方面,考虑渠道竞争对供应链成员定价和利润的影响受到越来越多学者的关注.李宗活等^[5]基于Hotelling模型研究线上网络渠道和线下实体渠道市场竞争格局及其博弈关系,给出了具有市场进入时序的渠道退出边界.王文宾等^[6]考虑政府实施押金返还制度,研究了制造商竞争背景下废旧电器电子产品的回收决策问题.姚锋敏等^[7]基于改进的K-S法对闭环供应链进行协调,发现零售商的价格竞争可以有效提高产品销量,促进废旧产品的回收.周永务等^[8]考虑一个由两个竞争零售商和一个供应商组成的两级供应链,研究了零售商的竞争和公平关切行为对其联合购买策略的影响,结果表明竞争强度越大使用联合购买策略的优势越明显.王文隆等^[9]在低碳背景下研究了公平关切对制造商竞争最优决策的影响,发现价格竞争可提高制造商的低碳水平.此外,也有学者针对回收环节的竞争问题展开研究. Esenduran等^[10]分析了不同认证标准对竞争

性回收渠道均衡决策的影响,发现降低回收商进入壁垒可以促进竞争.许民利等^[11]从公平关切的视角出发,研究了回收平台的竞争行为对逆向供应链成员利润和效用的影响.以上研究都是一个供应链两个渠道之间的竞争,也有学者就两个供应链之间的竞争展开研究. Taleizadeh等^[12]基于内外部竞争环境的视角,研究了3种不同博弈结构下的成员决策变量和利润函数,最后比较分析了不同结构的供应链的利弊.罗剑玉等^[13]研究两个竞争性绿色供应链中制造商提供绿色服务的信息共享问题,构建了4种不同场景下的多阶段博弈模型用于分析信息共享价值,结果发现零售商的信息共享不仅有利于供应链获利,还可引发另一条供应链的竞争反应.

在供应链技术创新研究方面,张正等^[14]从企业技术创新的视角出发,构建了三阶段博弈模型研究政府研发补贴和消费者补贴对企业创新水平和供应链价值创造的影响.俞超等^[15]研究了政府补贴背景下不同权力结构对低碳技术创新策略的影响,结果表明低碳产品制造商为市场主导的模式下低碳技术的创新水平最高.胡俊等^[16]将政府竞争政策与技术创新因素引入到两级供应链模型中,研究了不同情形下政府竞争奖励与技术创新努力水平对各级制造商最优利润的影响.鲁馨蔓等^[17]考虑了时间因素对产品技术先进度的影响,基于微分博弈模型在动态框架下研究云服务产品的定价和技术创新问题,并对两种契约模式下成员的均衡结果进行比较分析.郭强等^[18]研究了网络外部性对竞争性制造商创新技术选择的影响.上述研究主要集中在单个供应链主体或者正向供应链领域的技术创新,少数学者研究了再制造逆向供应链的技术创新对成员定价以及利润的影响.许民利等^[19]考虑无技术创新、原制造商技术创新、第三方再制造商技术创新和双方同时技术创新4种不同的模式,研究了技术创新对原产品和再制品定价以及成员利润的影响.朱宾欣^[20]等构建3种技术创新下的博弈模型,研究了原制造商专利保护对再制造商技术创新策略的影响,研究表明,再制造商的技术创新水平随着消费者对再制品估值的增加而提高.张娟等^[21]研究了纵向供应链中技术创新模式的选择问题,发现当新产品的市场接受度较高时,供应商和制造商合作研发能够实现双赢.

以上文献大都在静态框架下研究供应链成员竞争决策和技术创新的模式选择问题,然而因为电子产品具有更新速度快、生命周期短等特点,消费者存在重复购买行为,而且逆向供应链成员竞争和电子废弃

物的回收再制造过程往往呈现出长期性和动态性的特征,所以在连续时间背景下考虑成员竞争的动态定价和回收再制造更符合实际情况. el Ouardighi 等^[22]在零售商竞争的背景下研究了批发价格契约和收益共享契约下成员的均衡决策,并推导出纳什均衡点的条件. Cheng 等^[23]利用微分博弈理论构建两个供应链的竞争模型,并在连续时间背景下研究了分散决策、集中决策和联合决策3种情况下的企业社会责任决策问题,结果表明企业竞争强度与企业社会责任努力呈正相关. 刘亮等^[24]将HJB阶段控制和契约协调引入动态回收闭环供应链的研究中,发现在激励成本分担契约下,制造商收益可以实现帕累托改进.

综上所述,学者们的研究主要集中于竞争决策和技术创新模式的选择对成员均衡策略和供应链协调的影响,并取得了丰硕的成果. 然而,大部分文献都是研究正向供应链中的渠道竞争,考虑逆向供应链渠道竞争的研究较少,而且没有考虑再制造技术创新的动态特征,也鲜有文献将回收渠道竞争与再制造商动态技术创新相结合进行研究. 基于此,本文在已有研究成果的基础上,以回收渠道竞争的逆向供应链为背景,考虑不确定因素和随机干扰对再制造技术创新的影响,利用伊藤过程和微分博弈理论刻画电子废弃物再制造技术先进度的随机演化过程,揭示其动态随机演化特征,并在此基础上分析动态和稳定均衡状态下成员的均衡策略,为逆向供应链成员最优决策提供参考依据.

1 问题描述与假设

1.1 模型符号说明和基本假设

本文研究由线上线下竞争回收商、再制造商和消费者组成的动态逆向供应链. 其中:再制造商是渠道领导者,负责对电子废弃物进行分类处理,可再制造的电子废弃物经过再制造重新流入市场,不可再制造的电子废弃物通过分解、拆卸等处理获取残值. 线上线下回收商是渠道跟随者,分别以 p_o 和 p_u 从消费者手中回收电子废弃物,并以 p_m 转售给再制造商. 模型符号及含义如表1所示.

为了便于研究,本文作出以下假设.

假设1 借鉴文献[11, 25],结合本文具体情况,假设线上线下回收商与再制造商之间信息完全对称,三者均为风险中性的理性决策者,均以利润最大化为决策目标. 再制造商已经得到原制造商的授权许可,无需考虑向其支付专利费用.

假设2 不考虑电子废弃物回收之前的质量水平差异, p_o 、 p_u 和 p_m 反映不同主体分别进行回收时

表1 模型符号及含义

符号	含义
$p_o(t)$	线上回收商直接回收价格(决策变量)
$p_u(t)$	线下回收商直接回收价格(决策变量)
$Q_o(t)$	线上回收商的回收数量
$Q_u(t)$	线下回收商的回收数量
σ	直接回收价格竞争系数($\sigma > 0$)
A	再制品的销售单价
S	未实现再制造的电子废弃物利润残值
γ	消费者对直接回收价格的敏感系数($\gamma > 0$)
c_m	再制造商对电子废弃物再制造的成本
$p_m(t)$	再制造商转移回收价格(决策变量)
$\pi_m(t)$	再制造商利润
$\pi_o(t)$	线上回收商利润
$\pi_u(t)$	线下回收商利润
k	再制造技术创新努力水平成本系数($k > 0$)
$b(t)$	再制造技术创新努力水平
θ	再制造技术创新度的衰减率
μ	电子废弃物的平均可再制造率
η	再制品数量对再制造技术先进度的敏感系数($\eta > 0$)
$\delta\sqrt{B(t)}$	再制造技术先进度的波动率
$V_m(t)$	再制造商最优利润函数
$V_o(t)$	线上回收商的最优利润函数
$V_u(t)$	线下回收商的最优利润函数
ρ	市场利率
$b(t)$	再制造技术先进度
B_0	初始再制造技术先进度($B_0 > 0$)

市场的平均回收价格,体现电子废弃物质量的一般情况.

假设3 由于再制品市场的特殊性,消费者对再制品的估值具有一定的不确定性,导致再制品的价格受到消费者价值感知的影响而具有外部决定性,参考文献[11, 26],假设再制造商是再制品市场上价格的接受者,即再制品的销售价格 A 为外生变量. 为了促使线上线下回收商积极开展回收活动以及再制造商积极进行再制造和销售活动,假设 $p_m > p_o, p_m > p_u$,且 $A > c_m + p_m + S$.

假设4 线上线下回收商在回收市场上以直接回收价格作为竞争手段,属于Bertrand价格竞争,考虑到回收价格是消费者选择何种回收渠道的决定性

因素,在不影响研究结论的基础上,为了简化动态背景下的求解过程,并未考虑线上线下回收商在回收过程中的回收努力成本,参考文献[27-28],线上线下回收商的回收量函数可分别表示为

$$Q_o(p_o) = \gamma p_o - \sigma p_u, \quad Q_u(p_u) = \gamma p_u - \sigma p_o.$$

根据经济学原理,回收数量相对于产品本身回收价格的敏感性要比竞争对手产品回收价格的敏感性强,所以假定 $0 < \sigma < \gamma$.

1.2 再制造技术先进度的动力学模型

在经典文献中,再制品数量一般通过回收数量进行刻画,但并非所有回收的电子废弃物都可以进行再制造. 本文在传统文献的基础上细化对再制品数量的描述,认为再制品数量除了受到回收数量的影响,还受到再制造技术先进度的影响. 而再制造技术先进度受到可控因素和不可控因素两方面的影响. 其中可控因素主要体现在再制造商技术创新努力水平,为满足经济学中的边际成本递增假设,令再制造商技术创新努力投入成本为技术创新努力的二次函数,即 $C(b(t)) = kb^2(t)/2$. 不可控因素包括再制造设备老化、再制造商环保意识的衰退以及不利的自然环境等. 此外,本文考虑随机扰动因素,认为再制造技术创新过程受到标准维纳过程的影响,其波动率与再制造技术先进度的平方根成正比. 综合上述影响因素,可将再制造技术先进度的演进过程描述为如下伊藤过程:

$$dB(t) = (b(t) - \theta B(t))dt + \delta\sqrt{B(t)}dz(t).$$

基于对回收量函数和再制造技术先进度的刻画,再制品数量可描述为

$$D(t) = \mu(Q_o + Q_u) + \eta B(t).$$

2 随机微分博弈模型建立与求解

通过对再制造技术先进度的动态刻画研究供应链成员的均衡决策问题,供应链成员均以自身利润最大化为目标. 因此,在再制造商是领导者、线上线下回收商是跟随者的权力结构下,逆向供应链均衡策略的 Stackelberg 随机微分博弈模型可描述如下:

$$\max_{p_m, b} \pi_m = \int_0^\infty e^{-\rho t} \left((A - p_m(t) - c_m)D(t) + S(Q_o + Q_u - D(t)) - \frac{kb^2(t)}{2} \right) dt;$$

$$\text{s.t. } \max_{p_o(t)} \pi_o = \int_0^\infty (p_m(t) - p_o(t))(\gamma p_o(t) - \sigma p_u(t))dt,$$

$$\max_{p_u(t)} \pi_u =$$

$$\int_0^\infty (p_m(t) - p_u(t))(\gamma p_u(t) - \sigma p_o(t))dt, \\ dB(t) = (b(t) - \theta B(t))dt + \delta\sqrt{B(t)}dz(t).$$

2.1 动态均衡状态下成员的均衡策略

为了得到线上线下回收商和再制造商的反馈策略,引入贝尔曼动态规划理论和随机微分博弈理论进行分析,认为供应链成员的决策行为不仅与时间有关,还依赖于当前状态. 为了简洁起见,分析过程中省略时间变量.

命题1 线上线下回收商的最优直接回收价格、再制造商的最优转移回收价格和最优再制造技术创新努力水平分别为

$$p_o^* = p_u^* = \frac{\gamma\mu(A - c_m - S) + S\gamma}{2\mu(2\gamma - \sigma)} - \frac{\eta B}{4\mu(\gamma - \sigma)}, \\ p_m^* = \frac{(A - c_m - S)\mu + S}{2\mu} - \frac{(2\gamma - \sigma)\eta B}{4\gamma\mu(\gamma - \sigma)}, \\ b^* = V_m'/k.$$

命题2 线上线下回收商的最优利润和再制造商的最优利润分别为

$$V_o^*(B) = f_1 B^2 + f_2 B + f_3, \\ V_u^*(B) = g_1 B^2 + g_2 B + g_3, \\ V_m^*(B) = q_1 B^2 + q_2 B + q_3.$$

其中

$$f_1 = g_1 = \frac{(\gamma - \sigma)^2 \xi^2 k}{\gamma(\rho k - 4q_1 + 2k\theta)}, \\ f_2 = g_2 = \frac{2f_1 q_2 \gamma - 2\chi \xi k(\gamma - \sigma)^2}{\gamma(\rho k - 2q_1 + k\theta)}, \\ f_3 = g_3 = \frac{k\chi^2(\gamma - \sigma)^2 + \gamma f_2 q_2}{\gamma \rho k}; \\ q_1 = \frac{k \left(2\theta + \rho - \sqrt{(2\theta + \rho)^2 - \frac{4\xi\eta(2\gamma - \sigma)}{k\gamma}} \right)}{4}, \\ q_2 = \frac{\eta k(\chi\mu(2\gamma - \sigma) - S\gamma)}{\gamma\mu(\rho k - 2q_1 + k\theta)}, \\ q_3 = \frac{2\chi^2\mu(2\gamma - \sigma)(\gamma - \sigma)}{\gamma\rho} + \frac{q_2^2}{2\rho k}; \\ \chi = \frac{\gamma\mu(A - c_m - S) + S\gamma}{2\mu(2\gamma - \sigma)}, \quad \xi = \frac{\eta}{4\mu(r - \sigma)}.$$

由命题1和2命题2可知,成员的定价策略和再制造技术创新努力水平都是再制造技术先进度的线性函数. 鉴于 $\partial p_o/\partial B = \partial p_u/\partial B < 0, \partial p_m/\partial B < 0, \partial b/\partial B > 0$, 可知在均衡状态下, p_o 、 p_u 和 p_m 都随着 B 的增加而减小, 而 b 随着 B 的增加而增加. 这表

明较高的再制造技术先进度会促使再制造商增加技术创新努力的投入,并降低从线上线下回收商处回收电子废弃物的转移回收价格,相应的线上线下回收商也会降低从消费者手中回收电子废弃物的直接回收价格.此外,鉴于 $f_1 = g_1 > 0, q_1 > 0$, 有 $V''_o(B) = V''_u(B) > 0, V''_m(B) > 0$, 由此可知,线上线下回收商和再制造商的最优利润函数都是关于再制造技术先进度的凸函数,这表明随着 B 的增加,供应链各成员的利润先减小后增大.对于再制造商而言,技术先进度的提高需要增加技术创新努力水平,进而导致创新成本增加,所以前期利润会呈现减小趋势,再制造商也会相应降低转移回收价格来缩减成本开支,但技术先进度的提高也会提高电子废弃物的可再制造率,长期而言有助于再制造商赚取更多的利润.对于回收商而言,前期降低直接回收价格会导致其利润降低,但随着时间的推移,受再制造商主导因素的影响,两者在进行博弈时回收商也会间接从再制造技术先进度提高中获益.因此,再制造商应该提高自己的再制造技术先进度以实现持续发展.

2.2 再制造技术先进度动态随机演化特征

本节引入时间因素,在动态框架下研究再制造技术创新问题.由于再制造技术先进度受到随机因素的影响,为了揭示再制造技术先进度随机演化特征规律,需要对其期望和方差以及期望和方差的稳定性进行深入研究.

命题3 再制造技术先进度的期望和系统达到稳态状态 ($t \rightarrow \infty$) 时再制造技术先进度的期望分别为

$$E(B) = e^{H_2 t} \left(B_0 + \frac{H_1}{H_2} - \frac{H_1}{H_2} e^{-H_2 t} \right),$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} E(B) = -\frac{H_1}{H_2}, H_2 < 0.$$

其中: $H_1 = q_2/k, H_2 = 2q_1/k - \theta$.

命题4 再制造技术先进度的方差和系统达到稳态状态 ($t \rightarrow \infty$) 时再制造技术先进度的方差分别为

$$D(B) = e^{2H_2 t} \left(B_0 + \frac{H_1}{H_2} - \frac{H_1}{H_2} e^{-H_2 t} \right)^2 - e^{2H_2 t} \left(B_0^2 + \frac{(2H_2 B_0 + H_1)(2H_1 + \delta^2)}{2H_2^2} \right) - e^{H_2 t} \frac{(H_2 B_0 + H_1)(2H_1 + \delta^2)}{H_2^2} + \frac{H_1(2H_1 + \delta^2)}{2H_2^2},$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} D(B) = \frac{H_1(2H_1 + \delta^2)}{2H_2^2} - \frac{H_1^2}{H_2^2}.$$

由命题3和命题4可知,虽然再制造技术先进度

受到随机因素的干扰而与其期望存在偏差,但当系统达到稳态状态 ($t \rightarrow \infty$) 时,再制造技术先进度的期望趋于一个稳态值,方差受到随机干扰项的影响.这说明再制造技术先进度最终达到一个稳定状态,且在一定可信度下始终围绕其期望上下波动.当随机干扰项不存在时,方差为零,此时再制造技术先进度等于再制造技术先进度的期望.所以管理者可以在允许的误差下,通过对再制造技术期望的把握来制定相应的决策以实现管理目标.

2.3 稳定均衡状态下成员的均衡策略

为了研究供应链成员均衡策略的一般性规律,本节不考虑随机干扰项,研究 t 趋于无穷大时成员均衡策略的稳态值.

命题5 当逆向供应链达到稳态状态 ($t \rightarrow \infty$) 时,均衡状态下线上线下回收商的最优直接回收价格、再制造商的最优转移回收价格、最优再制造技术创新努力水平以及再制造技术先进度的曲线分别为

$$p_o(t) = p_{o\infty} - \frac{\eta}{4\mu(\gamma - \sigma)} (B_0 - B_\infty) e^{H_2 t},$$

$$p_u(t) = p_{u\infty} - \frac{\eta}{4\mu(\gamma - \sigma)} (B_0 - B_\infty) e^{H_2 t},$$

$$p_m(t) = p_{m\infty} - \frac{(2\gamma - \sigma)\eta}{4\gamma\mu(\gamma - \sigma)} (B_0 - B_\infty) e^{H_2 t},$$

$$b(t) = b_\infty(t) + \frac{2(\gamma - \sigma)^2 \xi^2}{\gamma(\rho k - 4q_1 + 2k\theta)} (B_0 - B_\infty) e^{H_2 t},$$

$$B(t) = (B_0 - B_\infty) e^{H_2 t} + B_\infty.$$

其中

$$p_{o\infty} = p_{u\infty} = \frac{\gamma\mu(A - c_m - S) + S\gamma}{2\mu(2\gamma - \sigma)} + \frac{\eta H_1}{4\mu(\gamma - \sigma)H_2},$$

$$p_{m\infty} = \frac{(A - c_m - S)\mu + S}{2\mu} + \frac{(2\gamma - \sigma)\eta H_1}{4\gamma\mu(\gamma - \sigma)H_2},$$

$$b_\infty(t) = \frac{f_2}{k} - \frac{4(\gamma - \sigma)^2 \xi^2 f_1 H_1}{\gamma(\rho k - 4q_1 + 2k\theta)kH_2},$$

$$B_\infty = -\frac{H_1}{H_2}.$$

由命题5可知,当 t 趋于无穷大时,均衡的 $p_o(t)$ 、 $p_u(t)$ 、 $p_m(t)$ 、 $b(t)$ 和 $B(t)$ 都收敛于各自的稳态值 $p_{o\infty}(t)$ 、 $p_{u\infty}(t)$ 、 $p_{m\infty}(t)$ 、 $b_\infty(t)$ 和 $B_\infty(t)$. 此时,电子废弃物的直接回收价格曲线和转移回收价格曲线都随时间单调递增.这是因为此时再制造商的再制造技术先进度高于市场稳定水平,减少了其再制造技术创新努力水平的投入,所以再制造商可以先以较高的

回收价格吸引消费者提高市场占有率,然后提高回收价格以减少回收成本,进而提高利润,与渗透定价策略原理相通.当 $B_0 < B_\infty$ 时,电子废弃物的直接回收价格曲线和转移回收价格曲线随时间单调递减,这是因为此时再制造商的再制造技术先进度低于市场稳定水平,需要额外付出更多的再制造技术创新努力,所以再制造商会先以较低的回收价格降低自身回收成本,然后提高回收价格维持市场占有率,与撇脂定价策略原理相通.所以企业可将自身再制造技术先进度水平与市场平均水平作比较,以选择合适的定价策略更好地适应市场发展.

为了研究参数 σ 和 γ 对 B 的影响,在逆向供应链达到稳定状态($t \rightarrow \infty$)时进行分析,得到以下推论.

推论1 再制造技术先进度 B 与直接回收价格竞争系数成正比.

由推论1可知,直接回收价格竞争系数越大,越有利于提高再制造技术先进度,即回收商竞争越激烈,再制造技术先进度越高.这是因为线上线下回收商竞争越激烈,游离于市场上的电子废弃物越少,因此线上线下回收商需要通过提高再制造技术先进度的方法提升自身竞争力,以提高回收的电子废弃物的再制造比例,这也符合竞争促进创新发展的市场理论.

推论2 再制造技术先进度 B 与消费者对直接回收价格的敏感系数 γ 成反比.

由推论2可知,消费者对直接回收价格敏感度越高,越不利于提高再制造技术先进度.这是因为当消费者对直接回收价格较敏感时,参与回收的意愿较强,游离在市场上的电子废弃物变多,此时线上线下回收商通过较多的回收数量即可获利,投入额外成本进行技术创新的动力减小.

3 算例分析

为了更加直观地分析直接回收价格竞争系数和消费者对直接回收价格的敏感系数对再制造技术先进度、成员均衡策略和最优利润的影响,结合算例,对逆向供应链动态均衡状态和稳定均衡状态分别进行参数的灵敏度分析,揭示再制造技术先进度的动态演化规律和成员的动态定价规律.相关参数赋值如下: $A = 10, c_m = 2, S = 1, \mu = 0.7, k = 1, \rho = 0.05, \theta = 1, \delta = 0.1, \eta = 0.2$.为了使逆向供应链在稳定状态下收敛,结合变量关系和实际情况可知,当 $\gamma = 1$ 时, σ 的合理区间为 $0 < \sigma < 0.84$,当 $\sigma = 0.4$ 时, γ 的合理区间为 $\gamma > 0.59$.

3.1 动态均衡状态下参数的灵敏度分析

当逆向供应链未达到稳定状态时,为了研究不同 σ 对成员均衡策略的影响,在参数合理区间内,取 $\gamma = 1, \sigma = 0.2, 0.4, 0.6, 0.8$,分析存在随机干扰项时,不同 σ 取值下 B 随时间变化的演化过程(图1).由于 $E(B)$ 趋于一个稳态值,而且当随机干扰项为零时方差为零,为了得到一般性结论,在随机干扰项为零时,分别绘制不同 σ 取值下 b 随时间变化的演化过程(图2)、 $p_o(p_u)$ 随时间变化的演化过程(图3)和 p_m 随时间变化的演化过程(图4).

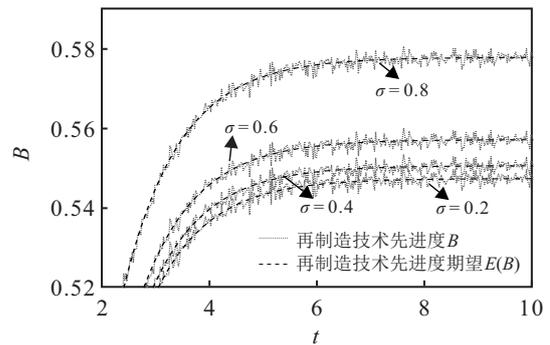


图1 不同 σ 下 B 随时间变化的演化过程

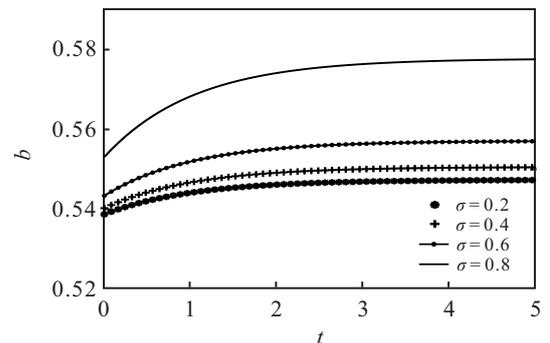


图2 不同 σ 下 b 随时间变化的演化过程

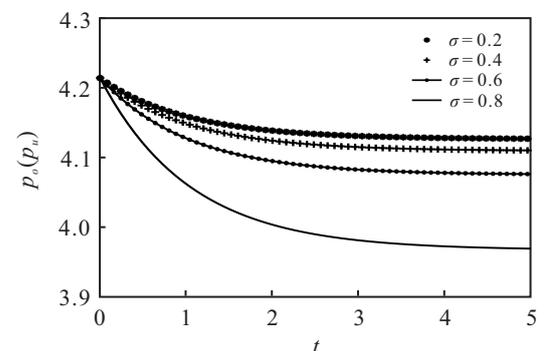


图3 不同 σ 下 $p_o(p_u)$ 随时间变化的演化过程

由图1可知,不同 σ 下 B 随时间推移先增加后趋于稳定,始终围绕其期望 $E(B)$ 上下波动,最终 $E(B)$ 稳定于稳态值 B_∞ .线上线下回收商的竞争程度与再制造技术先进度正相关,进一步验证了推论1.

由图2~图4可知,随着时间推移,不同 σ 下 b 先

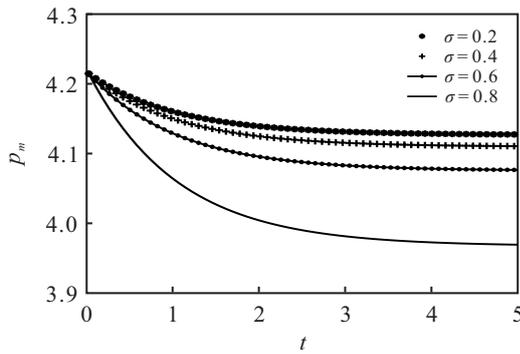


图4 不同 σ 下 p_m 随时间变化的演化过程

增加后趋于稳态值 b_∞ , $p_o(p_u)$ 和 p_m 均是先减小后趋于各自的稳态值 $p_{o\infty}(p_{u\infty})$ 和 $p_{m\infty}$. 随着 σ 的增大 b 增加, 结合图1可知, 回收商竞争越激烈, 越有利于激励再制造商积极投入创新努力进而提高再制造技术先进度. 随着 σ 的增大, $p_o(p_u)$ 增加而 p_m 降低, 这是因为在回收商竞争的回收市场环境下, 回收商竞争越激烈, 再制造商越能体现其主导优势, 进而趁机降低转移回收价格, 而激烈的竞争导致游离于市场上的电子废弃物减少, 为了增加回收量, 线上线下回收商只能试图提高直接回收价格以激励消费者.

当逆向供应链未达到稳定状态时, 为了研究不同 γ 对成员均衡策略的影响, 在参数合理区间内, 取 $\sigma = 0.4, \gamma = 0.8, 1.0, 1.2, 1.4$, 分析了存在随机干扰项时, 不同 γ 取值下 B 随时间变化的演化过程(图5). 在随机干扰项为零时, 分别绘制不同 σ 取值下 b 随时间变化的演化过程(图6)、 $p_o(p_u)$ 随时间变化的演化过程(图7)和 p_m 随时间变化的演化过程(图8).

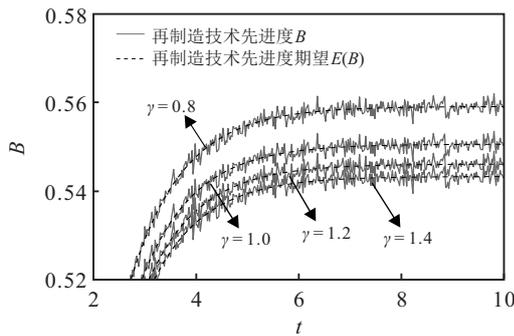


图5 不同 γ 下 B 随时间变化的演化过程

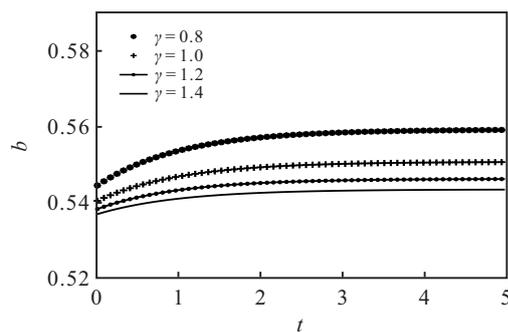


图6 不同 γ 下 b 随时间变化的演化过程

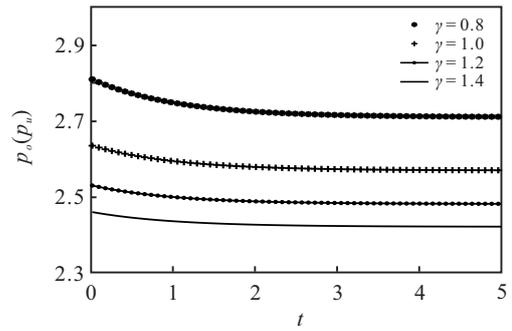


图7 不同 γ 下 $p_o(p_u)$ 随时间变化的演化过程

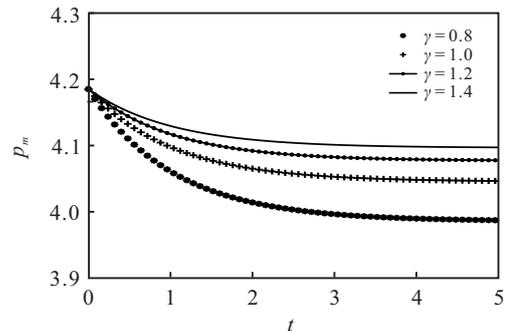


图8 不同 γ 下 p_m 随时间变化的演化过程

由图5可知, 不同 γ 下 B 始终围绕其期望值 $E(B)$ 上下波动, 随时间推移呈现先增加后趋于稳定的趋势, $E(B)$ 最终稳定于稳态值 B_∞ , 并且消费者对直接回收价格的敏感程度与再制造技术先进度负相关, 进一步验证了推论2.

由图6~图8可知, 随着时间的推移, 不同 γ 下 b 先增加后趋于稳态值 b_∞ , $p_o(p_u)$ 和 p_m 均是先减小后趋于各自的稳态值 $p_{o\infty}(p_{u\infty})$ 和 $p_{m\infty}$. 结合推论2分析可知, 随着 γ 的增大, 再制造商会因为回收数量的增加而减少技术创新努力水平, 进而导致再制造技术先进度降低. 消费者对直接回收价格越敏感, 期待回收商给予的回收价格越高, 由于两个回收商之间存在竞争且处于对称地位, 当一方降低直接回收价格以使消费者选择竞争对手进行回收时, 另一方也会做同样的选择, 线上线下回收商的直接回收价格均会降低. 随着 γ 的增大, 再制造商的转移回收价格降低, 且降低幅度大于回收商直接回收价格的降低幅度, 表明再制造商的主导优势体现得越明显.

3.2 稳定均衡状态下参数的灵敏度分析

本节研究当逆向供应链达到稳定状态时参数的灵敏度. 在参数的合理区间内, 分析当线上线下回收商直接回收价格竞争系数 $\sigma = 0.2, 0.4, 0.6, 0.8$, 消费者对直接回收价格的敏感系数 $\gamma = 0.8, 1.0, 1.2, 1.4$ 时, 逆向供应链成员的均衡策略、回收总量、再制品数量、再制品数量和回收总量的占比情况以及成员最优利润水平, 结果如表2所示(注: $j = o, u$).

表2 参数 σ 和 γ 对成员均衡策略的影响

	$p_{j\infty}$	$p_{m\infty}$	$p_{m\infty} - p_{j\infty}$	b_{∞}	$Q_{o\infty} + Q_{u\infty}$	D_{∞}	$D_{\infty}/(Q_{o\infty} + Q_{u\infty})$	$V_{j\infty}(B_{\infty})$	$V_{m\infty}(B_{\infty})$	
$\gamma = 1.0$	$\sigma = 0.2$	2.29	4.13	1.84	0.55	3.67	2.68	0.73	67.27	224.22
	$\sigma = 0.4$	2.57	4.11	1.54	0.55	3.08	2.27	0.74	47.50	189.70
	$\sigma = 0.6$	2.91	4.08	1.17	0.56	2.33	1.74	0.75	27.14	145.34
	$\sigma = 0.8$	3.31	3.97	0.66	0.58	1.32	1.04	0.79	8.74	86.27
$\sigma = 0.4$	$\gamma = 0.8$	2.71	4.06	1.35	0.56	2.17	1.63	0.75	29.37	135.88
	$\gamma = 1.0$	2.57	4.11	1.54	0.55	3.08	2.27	0.74	47.50	189.70
	$\gamma = 1.2$	2.48	4.13	1.65	0.55	3.97	2.89	0.73	65.59	241.89
	$\gamma = 1.4$	2.42	4.15	1.73	0.54	4.84	3.50	0.72	83.63	293.26

4 结论

本文针对再制造商和线上线下回收商构成的逆向供应链,在回收商竞争视角下引入时间因素,考虑了动态均衡状态和稳定均衡状态下再制造商技术创新对供应链成员均衡策略的影响,揭示了再制造技术先进度的动态随机演化特征,并在此基础上进行了重要参数的灵敏度分析,得到以下结论和管理启示:

1) 随着再制造技术先进度的提高,线上线下回收商的直接回收价格和再制造商的转移回收价格都降低,且直接回收价格的降低程度大于转移回收价格的降低程度,导致线上线下回收商的边际利润降低,所以再制造技术先进度的提高会缓解逆向供应链问题. 但过高的再制造技术先进度不利于提升电子废弃物的回收总量和再制造数量. 因此,企业在技术创新上投入的努力并非越多越好,应该合理分配资源.

2) 再制造技术先进度受到随机因素的干扰而始终围绕其期望上下波动,若不考虑干扰项的影响,则随着着时间的推移再制造技术先进度与其期望重合. 当逆向供应链达到稳定状态时,再制造技术先进度的期望趋于一个稳态值,所以时间趋于无穷大时,成员的均衡定价均收敛于各自的稳态值,当再制造技术先进度的初始值大于稳态值时,供应链成员应该利用自身的技术优势采取“渗透定价”策略,反之采取“撇脂定价”策略.

3) 线上线下回收商的竞争行为有利于再制造商投入更多的技术创新努力,进而提高再制造技术的先进度,回收商之间的竞争越激烈,直接回收价格越高,转移回收价格越低,进一步降低了回收商的单位获利水平,提高了社会效益. 两者的竞争还会提高电子废弃物整体的可再制造率,但是过度的竞争不利于电子废弃物的回收,而且因为回收成本过高而降低了回收

商的利润,所以回收商之间应该防止恶性竞争.

4) 消费者对直接回收价格的敏感度越高,再制造商投入技术创新努力的积极性越低. 导致再制造技术先进度降低,随着消费者敏感系数的增大,直接回收价格降低,转移回收价格增加,线上线下回收商的单位获利水平提升,进而提高了回收商的利润. 又因为消费者敏感程度的增加提高了回收的积极性,所以回收总量和再制品数量都增加,再制造商的利润得到提高,但是敏感度增加不利于提高电子废弃物整体的可再制造率,过高的敏感度会加剧逆向供应链的边际效应.

本文基于供应链成员完全理性的假设,对回收商竞争的逆向供应链技术创新与动态定价进行了研究,但实际上决策者都是有限理性的,而且线上线下回收商在回收过程中也存在回收服务的成本,因此,考虑成员有限理性以及回收服务成本差异是下一步的研究重点.

参考文献(References)

[1] Awasthi A K, Zeng X L, Li J H. Comparative examining and analysis of E-waste recycling in typical developing and developed countries[J]. Procedia Environmental Sciences, 2016, 35: 676-680.

[2] Xue Y Y, Wen Z G, Bressers H, et al. Can intelligent collection integrate informal sector for urban resource recycling in China?[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 208: 307-315.

[3] Johnson M R, McCarthy I P. Product recovery decisions within the context of extended producer responsibility[J]. Journal of Engineering and Technology Management, 2014, 34: 9-28.

[4] Govindan K, Soleimani H, Kannan D. Reverse logistics and closed-loop supply chain: A comprehensive review to explore the future[J]. European Journal of Operational

- Research, 2015, 240(3): 603-626.
- [5] 李宗活, 杨文胜, 司银元, 等. 基于电子优惠券投放和服务创新的线上线下渠道竞争分析[J]. 运筹与管理, 2020, 29(10): 212-220.
(Li Z H, Yang W S, Si Y Y, et al. Analysis of competition between online and offline channel with coupon distribution and service innovation[J]. Operations Research and Management Science, 2020, 29(10): 212-220.)
- [6] 王文宾, 王智慧, 杨斯奇, 等. 制造商竞争下闭环供应链的押金返还制度研究[J]. 中国管理科学, 2021, 29(6): 179-188.
(Wang W B, Wang Z H, Yang S Q, et al. Deposit-refund system of a closed-loop supply chain under competition between manufacturers[J]. Chinese Journal of Management Science, 2021, 29(6): 179-188.)
- [7] 姚锋敏, 刘珊, 滕春贤. 两零售商竞争下第三方回收闭环供应链的决策及协调[J]. 运筹与管理, 2021, 30(3): 83-89.
(Yao F M, Liu S, Teng C X. Decision and coordination for third-party collecting closed-loop supply chain with two competing retailers[J]. Operations Research and Management Science, 2021, 30(3): 83-89.)
- [8] 周永务, 杨丽芳, 曹彬, 等. 考虑公平关切行为下竞争零售商的最优联合购买策略研究[J]. 中国管理科学, 2021, 29(11): 158-169.
(Zhou Y W, Yang L F, Cao B, et al. Optimal group-buying strategies for competing retailers with fairness concern behavior[J]. Chinese Journal of Management Science, 2021, 29(11): 158-169.)
- [9] 王文隆, 任倩楠, 翟晓娜, 等. 考虑公平关切和制造商竞争的平台型供应链定价、低碳水平和服务水平决策[J]. 控制与决策, 2022, 37(4): 1045-1055.
(Wang W L, Ren Q N, Zhai X N, et al. Decisions of pricing, low-carbon level and service level in a platform supply chain considering fairness concern and manufacturers' competition[J]. Control and Decision, 2022, 37(4): 1045-1055.)
- [10] Esenduran G, Lin Y T, Xiao W L, et al. Choice of electronic waste recycling standard under recovery channel competition[J]. Manufacturing & Service Operations Management, 2020, 22(3): 495-512.
- [11] 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, 17(9): 1402-1411.
(Xu M L, Wang J, Jian H Y. Decision analysis of reverse supply chain under bidirectional fairness concerns of competitive recycling platforms[J]. Chinese Journal of Management, 2020, 17(9): 1402-1411.)
- [12] Taleizadeh A A, Sadeghi R. Pricing strategies in the competitive reverse supply chains with traditional and e-channels: A game theoretic approach[J]. International Journal of Production Economics, 2019, 215: 48-60.
- [13] 罗剑玉, 宋华, 杨晓叶, 等. 竞争性绿色供应链中制造商提供绿色服务的信息共享研究[J]. 中国管理科学, <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2835.G3.20210908.2044.005.html>.
(Luo J Y, Song H, Yang X Y, et al. Research on information sharing of manufacturers providing green services in competitive green supply chain[J]. Chinese Journal of Management Science, <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2835.G3.20210908.2044.005.html>.)
- [14] 张正, 孟庆春, 张文姬. 技术创新情形下考虑政府补贴的供应链价值创造研究[J]. 软科学, 2019, 33(1): 39-44.
(Zhang Z, Meng Q C, Zhang W J. Supply chain value creation considering government subsidy under technological innovation[J]. Soft Science, 2019, 33(1): 39-44.)
- [15] 俞超, 汪传旭, 高鹏. 不同市场权力结构下的制造商低碳技术创新策略[J]. 计算机集成制造系统, 2019, 25(2): 491-499.
(Yu C, Wang C X, Gao P. Low carbon technology innovation strategy of manufacturer under different market power structure[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2019, 25(2): 491-499.)
- [16] 胡俊, 吴君民, 吴洁, 等. 创新驱动下光伏产业供应链的竞协研究——基于政府竞争政策[J]. 中国管理科学, 2022, 30(10): 256-264.
(Hu J, Wu J M, Wu J, et al. Research on the competition and coordination of photovoltaic industry supply chain driven by innovation—Based on government competition policy[J]. Chinese Journal of Management Science, 2022, 30(10): 256-264.)
- [17] 鲁馨蔓, 李艳霞, 王君, 等. 云服务供应链技术创新与动态定价的微分博弈分析[J]. 运筹与管理, 2020, 29(6): 49-57.
(Lu X M, Li Y X, Wang J, et al. Differential game analysis of technological innovation and dynamic pricing in the cloud service supply chain[J]. Operations Research and Management Science, 2020, 29(6): 49-57.)
- [18] 郭强, 张婷, 李增禄, 等. 网络外部性对供应链创新技术投资策略的影响[J]. 管理工程学报, 2020, 34(4): 79-88.
(Guo Q, Zhang T, Li Z L, et al. Impact of network externalities on supply chain innovation technology investment strategy[J]. Journal of Industrial Engineering and Engineering Management, 2020, 34(4): 79-88.)
- [19] 许民利, 田成瑞, 简惠云. 专利保护下考虑技术创新

- 的再制造供应链差异定价[J]. 软科学, 2019, 33(9): 27-32.
(Xu M L, Tian C R, Jian H Y. Differential pricing of remanufacturing supply chain considering technological innovation under patent protection[J]. Soft Science, 2019, 33(9): 27-32.)
- [20] 朱宾欣, 马志强, 吴宁, 等. 原制造商专利保护对再制造供应链技术创新策略的影响[J]. 计算机集成制造系统, 2018, 24(9): 2329-2340.
(Zhu B X, Ma Z Q, Wu N, et al. Influence of original manufacturer's patent protection on technological innovation strategy of remanufacturing supply chain[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2018, 24(9): 2329-2340.)
- [21] 张娟, 王子玥, 余菲菲. 纵向供应链中新产品技术创新模式选择[J]. 管理学报, 2020, 17(11): 1697-1705.
(Zhang J, Wang Z Y, Yu F F. Choice of new product technology innovation models in vertical supply chain[J]. Chinese Journal of Management, 2020, 17(11): 1697-1705.)
- [22] el Ouardighi F, Jørgensen S, Pasin F. A dynamic game with monopolist manufacturer and price-competing duopolist retailers[J]. OR Spectrum, 2013, 35(4): 1059-1084.
- [23] Cheng H J, Ding H. Dynamic game of corporate social responsibility in a supply chain with competition[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 317: 128398.
- [24] 刘亮, 李斧头. 考虑激励模式的动态回收闭环供应链最优决策与协调研究[J]. 工业工程与管理, 2020, 25(2): 125-133.
(Liu L, Li F T. Optimal decision and coordination of closed-loop supply chain with dynamic recycling considering excitation mode[J]. Industrial Engineering and Management, 2020, 25(2): 125-133.)
- [25] 王勇, 蒋琼, 刘名武, 等. 竞争回收下制造商的回收定价与合作策略研究[J]. 控制与决策, DOI: 10.13195/j.kzyjc.2021.2276.
(Wang Y, Jiang Q, Liu M W, et al. Research on the manufacturer's recycling pricing and cooperation strategies under competitive recycling[J]. Control and Decision, DOI: 10.13195/j.kzyjc.2021.2276.)
- [26] Hahler S, Fleischmann M. Strategic grading in the product acquisition process of a reverse supply chain[J]. Production and Operations Management, 2017, 26(8): 1498-1511.
- [27] 朱晓东, 吴冰冰, 王哲. 双渠道回收成本差异下的闭环供应链定价策略与协调机制[J]. 中国管理科学, 2017, 25(12): 188-196.
(Zhu X D, Wu B B, Wang Z. Closed-loop supply chain pricing strategy and coordination mechanism under the difference of dual-channel recycling cost[J]. Chinese Journal of Management Science, 2017, 25(12): 188-196.)
- [28] 肖旦, 聂珊珊. 回收商相互竞争下闭环供应链成员的竞合策略[J]. 系统工程学报, 2021, 36(6): 833-850.
(Xiao D, Nie S S. Members' co-opetition strategy in closed-loop supply chains with competing recyclers[J]. Journal of Systems Engineering, 2021, 36(6): 833-850.)
- [29] 李小燕, 王道平. 碳交易机制下考虑竞争和信息非对称的供应链协调研究[J]. 运筹与管理, 2021, 30(11): 47-52.
(Li X Y, Wang D P. Study on the coordination of supply chain based on carbon trading mechanism considering the competition and asymmetry information[J]. Operations Research and Management Science, 2021, 30(11): 47-52.)
- [30] 叶欣, 周艳菊. 考虑商誉的双渠道供应链动态定价与联合减排策略[J]. 中国管理科学, 2021, 29(2): 117-128.
(Ye X, Zhou Y J. Dynamic pricing and joint emission reduction strategies in a dual-channel supply chain considering goodwill[J]. Chinese Journal of Management Science, 2021, 29(2): 117-128.)

作者简介

王道平(1964—), 男, 教授, 博士生导师, 从事供应链管理、知识管理等研究, E-mail: dpwang@ustb.edu.cn;

张可(1998—), 女, 硕士生, 从事供应链管理的研究, E-mail: zk162839@163.com;

周玉(1994—), 女, 博士生, 从事供应链管理的研究, E-mail: m18304232428@163.com.