

控制与决策

Control and Decision

异质性时间偏好下制造商主导的闭环供应链决策

张浩男, 于浚, 徐娜, 米佳晶

引用本文:

张浩男, 于浚, 徐娜, 等. 异质性时间偏好下制造商主导的闭环供应链决策[J]. *控制与决策*, 2025, 40(12): 3667–3677.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2025.0228>

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>

[两周期双寡头竞争环境中再制造影响](#)

Effect of remanufacturing on duopoly competition in two-period
控制与决策. 2021, 36(5): 1213–1222 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0840>

[需求和退货与供应中断相关环境下库存控制](#)

Inventory control under demands and returns dependent supply disruptions
控制与决策. 2021, 36(4): 1003–1009 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0980>

[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>

异质性时间偏好下制造商主导的闭环供应链决策

张浩男¹, 于 浚^{2†}, 徐 娜³, 米佳晶¹

- (1. 哈尔滨理工大学 经济与管理学院, 哈尔滨 150080;
2. 哈尔滨理工大学 自动化学院, 哈尔滨 150080;
3. 山东工商学院 工商管理学院, 山东 烟台 264100)

摘 要: 回收业务的长期运营属性决定了其决策过程的动态特征. 针对闭环供应链 (CLSC) 企业对远期收益存在的时间偏好异质性, 即制造商主导且时间偏好一致、零售商跟随且时间偏好不一致情形, 探究异质性时间偏好对 CLSC 系统回收、定价策略制定及回收模式选择的影响. 首先, 应用随机双曲折现模型, 构建零售商时间偏好不一致的跨期决策动态规划模型; 其次, 结合随机微分对策理论和逆向归纳法, 求解得到不同回收模式下的均衡回收投入、定价策略、可再利用率期望以及效用函数, 并对均衡结果进行比较分析. 研究发现: 相较于时间偏好不一致的成熟型零售商, 幼稚型零售商负责回收能使整个 CLSC 系统实现较高的效用; 时间偏好一致的制造商负责回收, 无论面对成熟型还是幼稚型零售商, 其回收行为均能促进废旧产品的有效利用, 进而确保整个 CLSC 系统达到最优状态. 因此, 制造商回收是 CLSC 系统的最佳回收模式, 且零售商时间偏好的不一致性可增强供应链成员采用制造商回收策略的意愿, 该结论与完全理性的静态模型研究不同.

关键词: 闭环供应链系统; 时间偏好不一致; 回收模式; 随机微分对策

中图分类号: F224 文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2025.0228

引用格式: 张浩男, 于浚, 徐娜, 等. 异质性时间偏好下制造商主导的闭环供应链决策 [J]. 控制与决策, 2025, 40(12): 3667-3677.

Decision making of manufacturer-dominated closed-loop supply chain under heterogeneous time preference

ZHANG Hao-nan¹, YU Hui^{2†}, XU Na³, MI Jia-jing¹

- (1. School of Economics and Management, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080, China;
2. School of Automation, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080, China;
3. School of Management, Shandong Technology and Business University, Yantai 264100, China)

Abstract: The long-term operation attribute of recycling business determines the dynamic characteristics of its decision-making process. This article considers time-preference heterogeneity for a firm's long-term benefits in a closed-loop supply chain (CLSC) system, that is, the situation in which the leader manufacturer has time-consistent preference and the follower retailer has time-inconsistent preference. Also, the impact of heterogeneous time preference is studied on the decision-making of recovery and pricing strategies and the selection of recycling modes in the CLSC system. Firstly, a stochastic hyperbolic discounting model is applied to construct a dynamic programming model for an inter-temporal decision when the retailer has time-inconsistent preference. Next, by combining the stochastic differential game and the reverse induction method, the equilibrium recycling investment, pricing strategy, expected recyclability rate, and utility functions are obtained under different recycling modes. Then, the equilibrium results are compared and analyzed. The results show that, compared to the mature retailer with time-inconsistent preference, the naive retailer taking responsibility for recycling can ensure the higher utility of the entire CLSC system. When the manufacturer with time-consistent preference is responsible for recycling, whether facing mature or naive retailers, his recycling behavior can promote the effective utilization of waste products, enabling the entire CLSC system to achieve the optimal utility. Therefore, manufacturer recycling mode is best for the CLSC system, and the inconsistency of

收稿日期: 2025-03-04; 录用日期: 2025-07-18.

基金项目: 国家自然科学基金项目 (72001059); 黑龙江省自然科学基金优秀青年基金项目 (YQ2023G004); 中国博士后科学基金面上项目 (2021M690606); 山东省自然科学基金面上项目 (ZR2024MG026).

责任编委: 刘士新.

†通信作者. E-mail: huiyu@hrbust.edu.cn.

retailer's time preference increases the willingness of supply chain members to adopt manufacturer recycling strategies, which is different from the research results of completely rational static models.

Keywords: CLSC system; time-inconsistent preference; recycling mode; stochastic differential game

0 引言

技术进步持续改变社会生活和生产方式的同时,电子垃圾(即废旧电子电器产品、电子电气设备及其零部件)正在成为全球增长最快的废弃物。据联合国环境规划署统计,2022年全球人均产生7.8 kg电子垃圾,近910亿美元稀有金属和原材料被废弃^[1]。众多企业正携手上、下游伙伴,构建“回收-循环-再利用”产业链,如伊士曼柯达制造再生循环照相机、惠普和爱普生生产可填充利用的打印机墨粉盒等^[2]。但全球只有22.3%的电子垃圾得到了充分收集、处理和回收^[3]。可见,闭环供应链(CLSC)作为一种通过回收和再制造优化资源利用的运营方式,该系统的回收管理关乎环境、经济价值最大化的实现,亦是目前研究的热点。

有关CLSC系统回收管理的理论研究,主要从静态和动态视角进行机理分析并建立静态或动态模型。静态模型聚焦探析回收渠道、渠道权力、合作模式以及价格竞争等对回收和定价决策的影响^[4-7],结果表明:成员间的合作有利于CLSC系统的可持续发展;当制造商作为领导者时,零售商回收是CLSC系统的最佳回收模式,且制造商不愿委托第三方进行废旧产品的回收。在产品价格、市场需求以及回收率等供应链内、外部环境固定不变的假设下,静态模型由于未考虑CLSC系统的长期运作特性,其最优策略不随时间波动,尽管具备实施便捷性,但只能实现系统短期利润或效用最大。当应对复杂多变的市场环境和长期发展需求时,静态模型已难以支撑系统的可持续发展。因此,对CLSC动态模型进行深入分析,成为保障其长远发展的必然选择。Giovanni等^[8]基于产品回收的动态特征假设,利用微分对策理论探讨了成本收益分摊契约下CLSC系统回收和定价的决策问题;Xiao等^[9]、马德青等^[10]将Giovanni等^[8]的研究推广至随机情形,通过引入伊藤过程描绘回收率的随机特征,揭示了第三方回收商、零售商的公平关切行为对回收决策的影响规律;在马德青等^[10]研究的基础上,王道平等^[11]开展了智能回收对CLSC系统决策的影响探索。显然,CLSC系统动态模型研究已受到学者的关注,但仍处于起步阶段。

上述CLSC回收决策大多基于理性人的假设,即上、下游企业不考虑交易的时间节点,且双方具有一致性时间偏好(任意时刻对未来效用与当前效用

的相对偏好保持不变)。然而,Benzion等^[12]、Chapman^[13]的实证研究揭示出,在链上企业间完整交易过程中,资金结算会在多个时间点发生,这导致成员必须做出跨期决策,且决策者的时间偏好往往不一致,常表现出一种“现时偏向型偏好”。如当面对“今天得1个苹果和明天得2个苹果”的选择时,多数倾向前者;而在“1年得1个苹果和1年零1天得2个苹果”中权衡,多数选择后者。泰勒的苹果实验表明,决策者在时间偏好上存在非一致性,其对当前效用的重视高于对未来效用的考量。2013年,Harris等^[14]建立随机双曲折现模型,实现了时间偏好不一致行为的数学刻画;基于此,黄文礼等^[15]、白雨等^[16]分别在实物期权、低碳减排架构下探讨了投资定价的跨期决策。这种对未来时段产品效用的非理性估计会影响消费者的购买意愿,从而决定企业的回收和定价空间。长远看,废旧产品的回收再制造收益会进一步影响企业的回收积极性。

在跨期决策过程中,成员企业因资源分配理念和风险应对策略的分歧,致使各方在权衡当期收益和远期收益时,呈现出明显的异质性时间偏好,如一方表现出时间偏好一致性,另一方则表现出时间偏好不一致性。以消费电子行业为例,苹果公司聚焦研发回收机器人以精进拆卸工艺,自首款回收机器人Liam 1.0被推出,经过多轮技术升级和功能完善,使其回收效能持续上升^[17]。与之不同,渠道服务商京东则将重点放在回收、销售环节的快速响应上,通过以旧换新、30天意外换新等服务强化消费端的即时转化,如2024年京东618开门红阶段,手机以旧换新服务的订单量实现了100%的同比增长。然而,相关报道指出,活动结束后该服务并未激励客流量的增加,影响回收业务的持续发展^[18]。类似问题也出现在新能源汽车领域,宁德时代为构建电池闭环系统,提前布局了梯次利用技术,并通过跨期补贴激励长期合作^[19],但鉴于4S店季度业绩考核压力,超75%的退役车辆旧电池被引导至非正规处置渠道,这不仅降低了系统的合规率,还增加了环境风险^[20]。由此可见,若未充分考虑时间偏好的异质性,则引发决策冲突,进而导致资源配置率降低。因此,在异质性时间偏好背景下,探究CLSC系统的回收决策问题具有重要的理论和现实意义。

截至目前,关于CLSC系统回收决策及时间偏

好影响跨期决策的研究成果已然丰硕,但也存在一定局限: 1) CLSC 系统回收决策研究主要集中在静态模型,事实上,企业往往会根据市场环境的“风吹草动”而及时做出有利于自身的决策调整,因此动态模型更贴近现实; 2) 时间偏好影响跨期决策的研究聚焦在开环供应链系统,鲜有涉及 CLSC 系统,特别是决策主体的异质性时间偏好领域。

本文针对由一个制造商与一个零售商组成的 CLSC 系统,仅考虑零售商的时间偏好不一致性,构建异质性时间偏好下制造商主导的 Stackelberg 微分博弈模型,并利用随机微分对策理论得到制造商回收与零售商回收模式的均衡策略,通过对比明确最佳回收模式。

1 模型建立

考虑由一个制造商与一个零售商组成的 CLSC 系统,其中系统成员持有异质性时间偏好,具体地,制造商是时间偏好一致的,而零售商是时间偏好不一致的。在正向供应链中,制造商负责使用原材料或回收部件生产新产品和再制造产品,并以批发价格 $\omega(t)$ 销售给零售商,零售商则以零售价格 $p(t)$ 将产品销售给消费者;在逆向供应链中,通过实施制造商回收或零售商回收等自主模式,构建废旧产品的回收体系。根据工业和信息化部颁布的《再制造产品认定管理暂行办法》,再制造产品在性能和质量上达到或超过新品标准,方可进入市场。基于此,假设再制造产品与新产品在外观、质量、性能方面具有同质性^[21]。相关符号说明见表 1。

表1 符号说明

符号	含义
$A(t)$	t 时刻企业的回收投入
$\omega(t)/p(t)$	t 时刻产品的批发/零售价格
$\tau(t)$	t 时刻废旧产品的可再利用率
$\pi_m^M(t)(\pi_m^R(t))$	制造商(零售商)回收下制造商的利润函数
$\pi_r^M(t)(\pi_r^R(t))$	制造商(零售商)回收下零售商的利润函数
$V_m^i(\tau)$	制造商的效用函数($i = MM, MN, RM, RN$)
$V_r^i(\tau)$	零售商的效用函数($i = MM, MN, RM, RN$)
ρ	市场贴现率
Δ	每单位回收废旧产品的残值
β	短期折扣系数
λ	指数分布密度参数
γ	回收投入效果系数
δ	衰减率
a	消费者对废旧产品回收的偏好系数
b	消费者对产品零售价格的敏感系数

假设 1 参考 Harris 等^[14]提出的随机双曲折现

模型,旨在刻画因贴现率随时期变化而导致的时间偏好不一致行为,假设企业的贴现函数为

$$F(t, s) = \begin{cases} e^{-\rho(s-t)}, & s \in [t, t+d); \\ \beta e^{-\rho(s-t)}, & s \in [t+d, \infty). \end{cases} \quad (1)$$

其中: $[t, t+d)$ 和 $[t+d, \infty)$ 分别为现期区间和远期区间; ρ 为现期区间的市场贴现率,现期区间时长 d 是随机的,服从参数为 λ 的指数分布, $\mathbb{E}(d) = \frac{1}{\lambda}$,指数分布密度参数 λ 反映决策者偏好变化的频率,其值越小,现期区间的期望时长越大;短期折扣系数 $0 < \beta \leq 1$,反映决策者的现期偏好程度,也可理解为未来自我的到达率,其值越大,决策者的现期偏好程度越低。当双曲折现因子 $\beta = 1$ 或 λ 趋于 0 时,决策者对现期区间与远期区间的偏好程度一致。

假设 2 回收产品的可再利用率,即回收产品或材料通过拆解、修补、翻新等非破坏性处理后恢复原有功能并直接再利用的比例,其本质是回收技术资本的动态投入^[22]。企业回收努力主要体现在引入先进拆解设备、升级分拣技术以及研发再生利用工艺等。例如,自 2016 年底起,苹果公司持续升级 Daisy 机器人技术,优化传统压缩金属再制造方法,通过整合机器学习、气体冷却技术等,实现了废旧 iPhone 电池中钴等材料的高效循环利用,所有苹果设计的电池中使用回收钴的比例从 2021 年的 13% 增长至 2024 年的 76%。可见,回收技术的持续投入能够显著提升回收产品的可再利用率^[17]。为了描述企业回收投入对可再利用率的动态促进作用,参考黄宗盛等^[23]的研究,利用 Newlove-Arrow 模型,刻画废旧产品可再利用率 $\tau(t)$ 的动态演化

$$\begin{aligned} d\tau(t) &= (\gamma A(t) - \delta\tau(t))dt + \sigma(\tau(t))d\omega(t), \\ \tau(0) &= \tau_0. \end{aligned} \quad (2)$$

其中: $A(t)$ 为回收投入; $0 \leq \tau_0 \leq 1$ 为可再利用率初值,即企业未开展回收投入时,回收产品初始状态所对应的再利用率;因回收要求遵循行业标准,故设 τ_0 为常值; $\gamma > 0$ 为回收投入效果系数,衡量回收投入对可再利用率的的影响程度;因设备升级空间收容、技术改进饱和等,可再利用率的变化幅度将逐渐减缓,即发生衰减效应,设衰减率为 $\delta > 0$; $\sigma(\tau(t))$ 反映随机因素对可再利用率的的影响; $\omega(t)$ 为标准维纳过程。

假设 3 为了鼓励废旧产品回收,国家相继颁布《推动消费品以旧换新行动方案》《再生资源回收管理办法》。相关报道指出,以旧换新、回收利用活动在降低生产成本的同时,提升了产品的市场竞争力并激发环保偏好消费者的购买欲望。因此,考虑废旧产

品的可再利用率和零售价格对产品市场需求的综合效应,需求函数 $D(t)$ 可表示为

$$D(t) = a\sqrt{\tau(t)} - bp(t), \quad (3)$$

其中 a 和 b 分别反映消费者对回收、产品价格的敏感程度.随着废旧产品可回收利用率的提高,可再利用率将相应增加;当可回收利用率增至一定水平时,可再利用率会因处理技术逐渐成熟而增长显著.根据日本PET瓶回收协会数据显示,PET瓶的可回收利用率由2021年的94.1%升至2022年的94.4%,未见显著提升,而相应的可再利用率却增长得较明显,由86%提升至86.9%^[24].可见,可再利用率与可回收利用率间的非线性关系具有下凸特征,不妨设可回收利用率为 $\sqrt{\tau(t)}$,这里, $\sqrt{\tau(t)} > \tau(t)$ 揭示并非所有回收利用的废旧产品均能被修复再利用.

假设4 废旧产品回收成本是关于企业回收投入的二次凸函数^[25],即

$$C(A(t)) = \frac{1}{2}kA^2(t). \quad (4)$$

其中: $C(A(t))$ 为供应链成员投入的回收成本; k 为回收成本系数,其值越大,回收活动效率越低.为了保证文中可再利用率在给定范围是有界的且产品定价非负,要求相关系数满足 $k \geq \frac{(a+b\Delta)^2\gamma^2}{8b(\rho+\delta)\delta}$ 和 $a \geq b\Delta$.

2 制造商回收模式下的决策均衡

在该回收模式下,制造商不仅负责新产品的生产,同时承担废旧产品的回收和再制造.通过实施拆解、清洁、修复、改造等一系列工序,再制造产品需达到新产品标准,以便重新进入市场.最后,零售商将新产品或再制造产品销售给终端消费者.设每单位回收的废旧产品残值为 Δ ,该值亦代表再制造节约的单位成本,即再制造的成本效益.基于此,在 t 时刻制造商和零售商的利润函数可表示为

$$\begin{aligned} \pi_m^M(t) &= (\omega(t) + \Delta\sqrt{\tau(t)})D(t) - \frac{1}{2}kA^2(t), \\ \pi_r^M(t) &= (p(t) - \omega(t))D(t). \end{aligned}$$

其中: $\omega(t)D(t)$ 和 $(p(t) - \omega(t))D(t)$ 分别为制造商和零售商销售新产品和再制造产品所获得的利润, $\Delta\sqrt{\tau(t)}D(t)$ 为回收的废旧产品总残值.

具有时间偏好一致性的制造商对现期区间与远期区间的偏好程度一致,远期任意 s 时刻制造商的利润均按 $e^{-\rho(s-t)}$ 折现到当前 t 时刻.因此,制造商的回收与定价决策目标为 $\max_{w,A} \mathbb{E} \left[\int_0^\infty e^{-\rho t} \pi_m^M(t) dt \right]$.

考虑到零售商时间偏好不一致心理的影响,利

用式(1)建立不确定可再利用率下零售商的决策问题 $\max_p \mathbb{E} \left[\int_0^d e^{-\rho t} \pi_r^M(t) dt + \beta \int_d^\infty e^{-\rho t} \pi_r^M(t) dt \right]$,约束条件为式(2).根据罗鹏飞等^[26]的研究,当决策者时间偏好不一致程度加剧时,远期区间的价值将产生系统性折损,导致企业投资意愿降低,进而难以形成行业领导地位.由此可知,在异质性时间偏好框架下,具有时间偏好一致性的制造商将作为CLSC系统的领导者.具体地,由制造商主导的Stackelberg博弈决策时序如下:首先由制造商确定废旧产品的回收投入及批发价格;然后零售商结合市场环境制定零售价格.时间偏好不一致理论模型研究通常会考虑成熟和幼稚两种不同类型的决策者.下面,将应用随机微分对策理论,获得成熟零售商和幼稚零售商情形的均衡回收和定价策略.

2.1 成熟零售商情形(MM)

在MM模型下,成熟零售商不仅能准确预期到自身当期及未来各期的主观贴现函数,还能在不同时期依据相应的时间偏好做出正确的最优决策.显然,此类博弈问题存在多个均衡解,但本文集中于最自然的均衡解,即所有未来的自我会选择相同的回收投入和定价策略 $(A^{MM}, \omega^{MM}, p^{MM})$.因此,成熟零售商的未来自我效用函数 $\bar{V}_r^{MM}(\tau; A^{MM}, \omega^{MM}, p^{MM})$ 满足如下HJB方程:

$$\begin{aligned} \rho \bar{V}_r^{MM}(\tau) &= \\ (p^{MM} - \omega^{MM})(a\sqrt{\tau} - bp^{MM}) &+ \\ \frac{\partial \bar{V}_r^{MM}(\tau)}{\partial \tau} (\gamma A^{MM} - \delta \tau) &+ \frac{1}{2} \frac{\partial^2 \bar{V}_r^{MM}(\tau)}{\partial \tau^2} \sigma^2(\tau). \end{aligned} \quad (5)$$

制造商和成熟零售商的当期效用函数 $V_m^{MM}(\tau)$ 和 $V_r^{MM}(\tau)$ 满足如下HJB和Hamilton-Jacob-Bellman-Isaacs(HJBI)方程^[26]:

$$\begin{aligned} \rho V_m^{MM}(\tau) &= \\ \max_{\omega^{MM}, A^{MM}} \left[(\omega^{MM} + \Delta\sqrt{\tau})(a\sqrt{\tau} - bp^{MM}) - \right. & \\ \left. \frac{1}{2} k A^{MM2} + \frac{\partial V_m^{MM}(\tau)}{\partial \tau} (\gamma A^{MM} - \delta \tau) + \right. & \\ \left. \frac{1}{2} \frac{\partial^2 V_m^{MM}(\tau)}{\partial \tau^2} \sigma^2(\tau) \right], & \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \rho V_r^{MM}(\tau) &= \\ \max_{p^{MM}} \left[(p^{MM} - \omega^{MM})(a\sqrt{\tau} - bp^{MM}) + \right. & \\ \frac{\partial V_r^{MM}(\tau)}{\partial \tau} (\gamma A^{MM} - \delta \tau) + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 V_r^{MM}(\tau)}{\partial \tau^2} \sigma^2(\tau) + & \\ \left. \lambda (\beta \bar{V}_r^{MM}(\tau) - V_r^{MM}(\tau)) \right]. & \end{aligned} \quad (7)$$

命题1 在MM模型下,制造商和零售商的均衡回收和定价策略分别为

$$\omega^{MM} = \frac{a - b\Delta}{2b} \sqrt{\tau^{MM}}, p^{MM} = \frac{3a - b\Delta}{4b} \sqrt{\tau^{MM}},$$

$$A^{MM} = \frac{a_m^{MM} \gamma}{k}.$$

可再利用率的期望为

$$\mathbb{E}(\tau^{MM}) = \frac{a_m^{MM} \gamma^2}{k\delta} + \left(\tau_0 - \frac{a_m^{MM} \gamma^2}{k\delta} \right) e^{-\delta t}.$$

制造商和零售商的最优效用函数分别为

$$V_m^{MM}(\tau) = a_m^{MM} \tau + \frac{a_m^{MM2} \gamma^2}{2k\rho},$$

$$V_r^{MM}(\tau) = a_r^{MM} \tau + \frac{a_m^{MM} \gamma^2 (2\rho a_r^{MM} + \lambda \beta a_m^{MM})}{2k\rho(\rho + \lambda)}.$$

其中

$$a_m^{MM} = \frac{(a + b\Delta)^2}{8b(\rho + \delta)}, a_r^{MM} = \frac{(a + b\Delta)^2 (\rho + \delta + \lambda \beta)}{16b(\rho + \delta)(\rho + \delta + \lambda)}.$$

证明 首先确定产品的零售价格. 由式 (7) 右端最大化的一阶必要条件可得 $p^{MM} = \frac{a\sqrt{\tau} + b\omega}{2b}$. 将 p^{MM} 代入式 (6), 有

$$\rho V_m^{MM}(\tau) = \frac{(\omega + \Delta\sqrt{\tau})(a\sqrt{\tau} - b\omega)}{2b} - \frac{1}{2} k A^2 + \frac{\partial V_m^{MM}(\tau)}{\partial \tau} (\gamma A - \delta \tau) + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 V_m^{MM}(\tau)}{\partial \tau^2} \sigma^2(\tau).$$

同理可知, 制造商的批发价格和回收投入满足

$$\omega^{MM} = \frac{a - b\Delta}{2b} \sqrt{\tau}, A^{MM} = \frac{\partial V_m^{MM}(\tau)}{\partial \tau} \frac{\gamma}{k}.$$

其次将 ω^{MM} 代入 $p^{MM} = \frac{a\sqrt{\tau} + b\omega}{2b}$, 整理可得产品的均衡定价策略; 再将回收和定价策略 $A^{MM}, \omega^{MM}, p^{MM}$ 代入式 (5) ~ (7), 由最优控制理论推测关于 τ 的线性函数 $V_m^{MM}(\tau) = a_m^{MM} \tau + b_m^{MM}, \bar{V}_r^{MM}(\tau) = \bar{a}_r^{MM} \tau + \bar{b}_r^{MM}$ 和 $V_r^M(\tau) = a_r^{MM} \tau + b_r^{MM}$ 分别是 HJB 方程 (5) 和 (6) 以及 HJBI 方程 (7) 的解, 利用待定系数法易得

$$a_m^{MM} = \frac{(a + b\Delta)^2}{8b(\rho + \delta)}, a_r^{MM} = \frac{(a + b\Delta)^2 (\rho + \delta + \lambda \beta)}{16b(\rho + \delta)(\rho + \delta + \lambda)},$$

$$b_m^{MM} = \frac{a_m^{MM2} \gamma^2}{2k\rho}, b_r^{MM} = \frac{a_m^{MM} \gamma^2 (2\rho a_r^{MM} + \lambda \beta a_m^{MM})}{2k\rho(\rho + \lambda)}.$$

进一步, 将 a_m^{MM} 代入 $A^{MM} = \frac{a_m^{MM} \gamma}{k}$ 可得均衡回收投入; 并改写随机微分方程 (2) 为随机积分形式

$$\tau(t) = \tau_0 + \int_0^t \left[\frac{a_m^{MM} \gamma^2}{k} - \delta \tau(s) \right] ds + \int_0^t \sigma(\tau(s)) d\varpi(s). \quad (8)$$

式 (8) 对 $\tau(t)$ 求期望可得

$$\mathbb{E}(\tau(t)) = \tau_0 + \int_0^t \left[\frac{a_m^{MM} \gamma^2}{k} - \delta \mathbb{E}(\tau(s)) \right] ds.$$

显然, 上式是初始条件为 $\mathbb{E}(\tau_0) = \tau_0$ 的常微分方程, 求解可得可再利用率的期望 $\mathbb{E}(\tau^{MM})$. \square

在命题 1 中, 当双曲折现因子 $\beta = 1$ 或 λ 趋于 0 时, 容易获得一致性时间偏好下制造商主导且负责回收的 CLSC 系统的均衡解, 详见如下推论.

推论 1 当制造商主导的 CLSC 系统成员均具有一致性时间偏好时, 制造商回收模式下的均衡回收和定价策略满足

$$\omega^M = \frac{a - b\Delta}{2b} \sqrt{\tau}, p^M = \frac{3a - b\Delta}{4b} \sqrt{\tau},$$

$$A^M = \frac{(a + b\Delta)^2 \gamma}{8bk(\rho + \delta)}.$$

最优效用函数 $V_m^M(\tau)$ 和 $V_r^M(\tau)$ 分别为

$$V_m^M(\tau) = \frac{(a + b\Delta)^2}{8b(\rho + \delta)} \tau + \frac{(a + b\Delta)^4 \gamma^2}{128b^2 k \rho (\rho + \delta)^2},$$

$$V_r^M(\tau) = \frac{(a + b\Delta)^2}{16b(\rho + \delta)} \tau + \frac{(a + b\Delta)^4 \gamma^2}{128b^2 k \rho (\rho + \delta)^2}.$$

在制造商回收模式下, 短期折扣系数 β 对回收投入、定价策略以及制造商的最优效用均没有产生影响 ($\frac{\partial A^{MM}}{\partial \beta} = \frac{\partial p^{MM}}{\partial \beta} = \frac{\partial \omega^{MM}}{\partial \beta} = \frac{\partial V_m^{MM}(\tau)}{\partial \beta} = 0$). 其根本原因在于, 产品定价受外部因素 (市场、成本、契约) 约束, 而时间偏好行为更多地影响企业内部运营决策, 如回收投入、库存、促销等. 因此, 当制造商和零售商采取了各自独立决策的 Stackelberg 非合作博弈时, 零售商的时间偏好不一致行为不会影响制造商的决策, 由此, 均衡结果与系统成员均具有一致性时间偏好情形相同. 但是, 零售商的时间偏好不一致行为不利于自身以及整个供应链最优效用的获取 ($\frac{\partial V_r^{MM}(\tau)}{\partial \beta} > 0, \frac{\partial (V_m^{MM}(\tau) + V_r^{MM}(\tau))}{\partial \beta} > 0$), 较小的短期折扣系数 β 表明零售商的时间偏好不一致行为更为显著, 进而零售商及整个供应链的最优效用水平降低. 不难发现, 与马晓平等^[27]、Wang 等^[28]关于公平关切、利他偏好等有限理性行为的研究不同, 时间偏好行为主要影响企业内部运营决策.

为了便于进一步分析, 令干扰项 $\sigma(\tau)d\varpi(t) = \sigma\sqrt{\tau(1-\tau)}d\varpi(t)$, 其中 σ 为常数. 应用随机微分方程理论, 如下推论明确了 CLSC 系统成员定价策略的稳态期望.

推论 2 在 MM 模型下, 当 $t \rightarrow \infty$ 时, 批发价格和零售价格的稳态期望分别为

$$\mathbb{E}(\omega_\infty^{MM}) = \frac{(a - b\Delta)T(A^{MM})}{2b},$$

$$\mathbb{E}(p_\infty^{MM}) = \frac{(3a - b\Delta)T(A^{MM})}{4b}.$$

其中: $T(A^{MM}) = B\left(\frac{2\delta}{\sigma^2}, \frac{1}{2}\right) / B\left(\frac{2\delta A^{MM}}{\sigma^2}, \frac{1}{2}\right)$, Beta 函数 $B\left(y, \frac{1}{2}\right) = \int_0^1 x^{y-1}(1-x)^{-\frac{1}{2}} dx$.

证明 易知, 随机微分方程 $d\tau(t) = (\gamma A^{MM} - \delta\tau)dt + \sigma\sqrt{\tau(1-\tau)}d\omega(t)$, $\tau(0) = \tau_0$ 的唯一解 $\tau^{MM}(t)$ 是一个 Markov 过程. 不妨设其经过时间 t 从初始状态 τ_0 到状态 τ 的转移概率密度函数为 $f(t, \tau; 0, \tau_0)$, 且满足 Fokker-Plank 方程

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \frac{\partial((\gamma A^{MM} - \delta\tau)f)}{\partial \tau} - \frac{1}{2} \frac{\partial^2(\sigma^2\tau(1-\tau)f)}{\partial \tau^2} = 0.$$

将上式简化为如下超几何方程:

$$\tau(1-\tau) \frac{\partial^2 f}{\partial \tau^2} + \left[2 - \frac{2\gamma A^{MM}}{\sigma^2} - \left(4 - \frac{2\delta}{\sigma^2}\right)\tau\right] \frac{\partial f}{\partial \tau} - \left(2 - \frac{2\delta}{\sigma^2}\right)f = 0.$$

求解可得

$$f(\tau) = \tau^{-1+\frac{2\gamma A^{MM}}{\sigma^2}}(1-\tau)^{-1-\frac{2(\gamma A^{MM}-\delta)}{\sigma^2}} \times \left[c_1 + c_2 \int \tau^{-\frac{2\gamma A^{MM}}{\sigma^2}}(1-\tau)^{\frac{2(\gamma A^{MM}-\delta)}{\sigma^2}} d\tau\right].$$

上述待定系数 c_1 和 c_2 使得 $\int_0^1 f(\tau)d\tau = 1$ 以及 $\int_0^1 f(\tau)\tau d\tau = \mathbb{E}(\tau^{MM}) = \frac{\gamma A^{MM}}{\delta}$ 成立, 则有

$$f(\tau) = \tau^{-1+\frac{2\gamma A^{MM}}{\sigma^2}}(1-\tau)^{-1-\frac{2(\gamma A^{MM}-\delta)}{\sigma^2}} \times \frac{\Gamma\left(\frac{2\delta}{\sigma^2}\right)}{\Gamma\left(\frac{2\gamma A^{MM}}{\sigma^2}\right)\Gamma\left(\frac{2\delta-2\gamma A^{MM}}{\sigma^2}\right)}.$$

其中: Gamma 函数 $\Gamma(x) = \int_0^\infty \tau^{x-1}e^{-\tau}d\tau, x > 0$.

根据 Gamma 函数与 Beta 函数间的关系可知

$$\begin{aligned} \mathbb{E}(\sqrt{\tau^{MM}}) &= \int_0^1 f(\tau)\sqrt{\tau}d\tau = \\ &= \frac{B\left(\frac{2\gamma A^{MM}}{\sigma^2} + \frac{1}{2}, -\frac{2(\gamma A^{MM}-\delta)}{\sigma^2}\right)}{B\left(\frac{2\gamma A^{MM}}{\sigma^2}, -\frac{2(\gamma A^{MM}-\delta)}{\sigma^2}\right)} = \\ &= \frac{B\left(\frac{2\delta}{\sigma^2}, \frac{1}{2}\right)}{B\left(\frac{2\delta A^{MM}}{\sigma^2}, \frac{1}{2}\right)} = T(A^{MM}). \end{aligned}$$

最后, 将 $\mathbb{E}(\sqrt{\tau^{MM}})$ 代入 ω^{MM} 和 p^{MM} , 得 MM 模型下批发价格和零售价格的稳态期望. \square

2.2 幼稚零售商情形 (MN)

在 MN 模型中, 幼稚零售商存在一种认知偏差, 即未来时期的自我将会遵循当前自我的时间偏好实施策略, 故等价于当前自我认为未来所有时期自我在时间偏好上是完全一致的. 因此, 幼稚零售商的未

来自我效用函数为 $V_r^M(\tau)$, 未来自我效用函数现值为 $\beta V_r^M(\tau)$. 类似于 MM 模型, 制造商和幼稚零售商的当期效用函数 $V_m^{MN}(\tau)$ 和 $V_r^{MN}(\tau)$ 满足方程

$$\begin{aligned} \rho V_m^{MN}(\tau) &= \\ &= \max_{\omega^{MN}, A^{MN}} \left[(\omega^{MN} + \Delta\sqrt{\tau})(a\sqrt{\tau} - bp^{MN}) - \frac{1}{2}kA^{MN2} + \frac{\partial V_m^{MN}(\tau)}{\partial \tau}(\gamma A^{MN} - \delta\tau) + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 V_m^{MN}(\tau)}{\partial \tau^2} \sigma^2(\tau) \right], \\ \rho V_r^{MN}(\tau) &= \\ &= \max_{p^{MN}} \left[(p^{MN} - \omega^{MN})(a\sqrt{\tau} - bp^{MN}) + \frac{\partial V_r^{MN}(\tau)}{\partial \tau}(\gamma A^{MN} - \delta\tau) + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 V_r^{MN}(\tau)}{\partial \tau^2} \sigma^2(\tau) + \lambda(\beta V_r^M(\tau) - V_r^{MN}(\tau)) \right]. \end{aligned}$$

其中 $V_r^M(\tau)$ 见推论 1. 利用逆向归纳法可得如下命题.

命题 2 在 MN 模型下, CLSC 系统成员的均衡回收和定价策略、可再利用率的期望以及效用函数均与 MM 模型一致, 即 $\omega^{MN} = \omega^{MM}, p^{MN} = p^{MM}, A^{MN} = A^{MM}, \mathbb{E}(\tau^{MN}) = \mathbb{E}(\tau^{MM}), V_m^{MN}(\tau) = V_m^{MM}(\tau), V_r^{MN}(\tau) = V_r^{MM}(\tau)$.

由命题 1 和命题 2 可知, 制造商回收模式下无论零售商是能精确预测各期主观贴现函数的成熟型企业, 还是存在认知偏差的幼稚型企业, MM 模型和 MN 模型的均衡回收和定价策略、可利用率期望以及效用均相同. 究其原因, 主导者制造商作为回收主体, 掌握着回收信息和成本结构, 而零售商仅负责正向销售流的价格制定. 受回收投入直接影响的可利用率与回收效果参数 γ 和成本效益 Δ 相关, 与零售商预测能力和认知无关, 且无法通过定价策略进行调整; 此外, 定价策略依赖市场需求系数 a, b 及可回收利用率 $\sqrt{\tau}$ 等, 不受零售商类型差异影响. 更本质的是, 在市场环境约束一致条件下, 不同类型的零售商面临的回收投入和利润最大化目标相同.

3 零售商回收模式下的决策均衡

在零售商回收模式下, 制造商通过提供一定数额的补贴 e 以激励零售商回收, 再将回收产品送至制造商处进行修复、再制造. 为确保零售商的回收积极性和制造商的再制造主动性, 假设 $0 < e < \Delta$. 此时, 制造商和零售商的利润函数分别为 $\pi_m^R(t) = (\omega(t) + \Delta\sqrt{\tau(t)} - e\sqrt{\tau(t)})D(t)$, $\pi_r^R(t) = (p(t) - \omega(t) + e\sqrt{\tau(t)})D(t) - \frac{1}{2}kA^2(t)$. 在异质性时间偏好下, 零售商回收 CLSC 系统成员的效用函数可分别表示为 $\max_w \mathbb{E} \left[\int_0^\infty e^{-\rho t} \pi_m^R(t) dt \right], \max_{p, A} \mathbb{E} \left[\int_0^d e^{-\rho t} \pi_r^R(t) dt + \right.$

$\beta \int_d^\infty e^{-\rho t} \pi_r^R(t) dt$], 约束条件为式(2). 该回收模式下, 由制造商确定产品的批发价格, 零售商结合市场环境制定废旧产品的回收水平及产品零售价格.

3.1 成熟零售商情形 (RM)

类似于MM模型, RM模型中制造商和成熟零售商的当期效用函数 $V_m^{RM}(\tau)$ 和 $V_r^{RM}(\tau)$ 满足方程

$$\begin{aligned} \rho V_m^{RM}(\tau) &= \max_{\omega^{RM}} \left[(\omega^{RM} + \Delta\sqrt{\tau} - e\sqrt{\tau}) \times \right. \\ & (a\sqrt{\tau} - bp^{RM}) + \frac{\partial V_m^{RM}(\tau)}{\partial \tau} (\gamma A^{RM} - \delta\tau) + \\ & \left. \frac{1}{2} \frac{\partial^2 V_m^{RM}(\tau)}{\partial \tau^2} \sigma^2(\tau) \right], \\ \rho V_r^{RM}(\tau) &= \max_{p^{RM}, A^{RM}} \left[(p^{RM} - \omega + e\sqrt{\tau})(a\sqrt{\tau} - \right. \\ & bp^{RM}) - \frac{1}{2} k A^{RM2} + \frac{\partial V_r^{RM}(\tau)}{\partial \tau} (\gamma A^{RM} - \delta\tau) + \\ & \left. \frac{1}{2} \frac{\partial^2 V_r^{RM}(\tau)}{\partial \tau^2} \sigma^2(\tau) + \lambda(\beta \bar{V}_r^{RM}(\tau) - V_r^{RM}(\tau)) \right]. \end{aligned}$$

其中, 零售商未来自我的效用函数 $\bar{V}_r^{RM}(\tau)$ 满足

$$\begin{aligned} \rho \bar{V}_r^{RM}(\tau) &= (p^{RM} - \omega^{RM} + e\sqrt{\tau})(a\sqrt{\tau} - bp^{RM}) - \\ & \frac{1}{2} k A^{RM2} + \frac{\partial \bar{V}_r^{RM}(\tau)}{\partial \tau} (\gamma A^{RM} - \delta\tau) + \\ & \frac{1}{2} \frac{\partial^2 \bar{V}_r^{RM}(\tau)}{\partial \tau^2} \sigma^2(\tau). \end{aligned}$$

命题 3 在RM模型下, 制造商和零售商的均衡回收和定价策略分别为

$$\begin{aligned} \omega^{RM} &= \frac{a + 2be - b\Delta}{2b} \sqrt{\tau^{RM}}, \\ p^{RM} &= \frac{3a - b\Delta}{4b} \sqrt{\tau^{RM}}, \\ A^{RM} &= \frac{a_r^{MM} \gamma}{k}. \end{aligned}$$

可再利用率的期望为

$$\mathbb{E}(\tau^{RM}) = \frac{a_r^{MM} \gamma^2}{k\delta} + \left(\tau_0 - \frac{a_r^{MM} \gamma^2}{k\delta} \right) e^{-\delta t}.$$

制造商和零售商的最优效用函数分别为

$$\begin{aligned} V_m^{RM}(\tau) &= a_m^{MM} \tau + \frac{a_m^{MM} a_r^{MM} \gamma^2}{k\rho}, \\ V_r^{RM}(\tau) &= a_r^{MM} \tau + \frac{a_r^{MM} \gamma^2}{2k\rho(\rho + \lambda)} \times \\ & [\rho a_r^{MM} + \lambda\beta(a_m^{MM} - a_r^{MM})]. \end{aligned}$$

与MM模型的结论相异, RM模型中零售商的时间偏好不一致行为对废旧产品回收、产品定价以及系统成员的最优效用均产生负效应. 具体而言, 较微弱的零售商时间偏好不一致性能促进零售商增加资

金于废旧产品回收 ($\frac{\partial A^{RM}}{\partial \beta} > 0$); 随着废旧产品回收量的增加, 为保障产品生产和回收过程的稳定运营, 制造商和零售商会相应提高批发价格和零售价格 ($\frac{\partial p^{RM}}{\partial \beta} > 0, \frac{\partial \omega^{MM}}{\partial \beta} > 0$), 从而获得更高的效用 ($\frac{\partial V_m^{RM}(\tau)}{\partial \beta} > 0, \frac{\partial V_r^{RM}(\tau)}{\partial \beta} > 0$).

参照制造商回收情形的研究, 易得如下推论.

推论 3 当制造商主导的 CLSC 系统成员均具有一致性时间偏好时, 零售商回收模式下的均衡回收和定价策略满足

$$\begin{aligned} \omega^R &= \frac{a + 2be - b\Delta}{2b} \sqrt{\tau}, \quad p^R = \frac{3a - b\Delta}{4b} \sqrt{\tau}, \\ A^R &= \frac{(a + b\Delta)^2 \gamma}{16bk(\rho + \delta)}. \end{aligned}$$

最优效用函数 $V_m^R(\tau)$ 和 $V_r^R(\tau)$ 分别为

$$\begin{aligned} V_m^R(\tau) &= \frac{(a + b\Delta)^2}{8b(\rho + \delta)} \tau + \frac{(a + b\Delta)^4 \gamma^2}{128b^2 k \rho (\rho + \delta)^2}, \\ V_r^R(\tau) &= \frac{(a + b\Delta)^2}{16b(\rho + \delta)} \tau + \frac{(a + b\Delta)^4 \gamma^2}{512b^2 k \rho (\rho + \delta)^2}. \end{aligned}$$

推论 4 在RM模型下, 当 $t \rightarrow \infty$ 时, 批发价格和零售价格的稳态期望分别为

$$\begin{aligned} \mathbb{E}(\omega_\infty^{RM}) &= \frac{(a + 2be - b\Delta)T(A^{RM})}{2b}, \\ \mathbb{E}(p_\infty^{RM}) &= \frac{(3a - b\Delta)T(A^{RM})}{4b}, \end{aligned}$$

其中 $T(A^{RM}) = \frac{B\left(\frac{2\delta}{\sigma^2}, \frac{1}{2}\right)}{B\left(\frac{2\delta A^{RM}}{\sigma^2}, \frac{1}{2}\right)}$.

3.2 幼稚零售商情形 (RN)

类似于MN模型, RN模型中制造商和幼稚零售商的当期效用函数 $V_m^{RN}(\tau)$ 和 $V_r^{RN}(\tau)$ 满足方程

$$\begin{aligned} \rho V_m^{RN}(\tau) &= \max_{\omega^{RN}} \left[(\omega^{RN} + \Delta\sqrt{\tau} - e\sqrt{\tau}) \times \right. \\ & (a\sqrt{\tau} - bp^{RN}) + \frac{\partial V_m^{RN}(\tau)}{\partial \tau} (\gamma A^{RN} - \delta\tau) + \\ & \left. \frac{1}{2} \frac{\partial^2 V_m^{RN}(\tau)}{\partial \tau^2} \sigma^2(\tau) \right], \\ \rho V_r^{RN}(\tau) &= \max_{p^{RN}, A^{RN}} \left[(p^{RN} - \omega + e\sqrt{\tau})(a\sqrt{\tau} - bp^{RN}) - \right. \\ & \frac{1}{2} k A^{RN2} + \frac{\partial V_r^{RN}(\tau)}{\partial \tau} (\gamma A^{RN} - \delta\tau) + \\ & \left. \frac{1}{2} \frac{\partial^2 V_r^{RN}(\tau)}{\partial \tau^2} \sigma^2(\tau) + \lambda(\beta V_r^R(\tau) - V_r^{RN}(\tau)) \right], \end{aligned}$$

其中 $V_r^R(\tau)$ 见推论 3.

命题 4 在RN模型下, CLSC 系统成员的均衡回收和定价策略、可再利用率期望均与RM模型一致, 即有 $\omega^{RN} = \omega^{RM}$, $p^{RN} = p^{RM}$, $A^{RN} = A^{RM}$, $\mathbb{E}(\tau^{RN}) = \mathbb{E}(\tau^{RM})$.

命题 5 在RN模型下, 制造商和零售商的最优效用函数分别为

$$V_m^{RN}(\tau) = V_m^{RM}(\tau),$$

$$V_r^{RN}(\tau) = a_r^{MM}\tau + \frac{\gamma^2(4\rho a_r^{MM2} + \lambda\beta a_m^{MM2})}{8k\rho(\rho + \lambda)}.$$

与制造商回收的MM模型和MN模型类似, RN模型的均衡回收和定价策略、可再利用率期望、制造商的最优效用均与RM模型保持一致. 由此说明, 尽管零售商是回收主体, 制造商作为供应链主导者仍能够通过批发价格和回收补贴调整零售商的决策偏差, 确保可回收利用率达到最优水平. 但不同的是, RN模型中零售商、整个 CLSC 系统的最优效用始终高于RM模型 ($V_r^{RN}(\tau) > V_r^{RM}(\tau)$, $V_m^{RN}(\tau) + V_r^{RN}(\tau) > V_m^{RM}(\tau) + V_r^{RM}(\tau)$), 此发现与微观经济学中的学习曲线效应相悖. 相较于幼稚企业, 成熟企业对不同时间点的收益/成本的贴现更稳定、一致, 更倾向于投资长期的回收技术研发或品牌建设, 重视长期收益的获取, 即便牺牲短期收益.

从命题 1~命题 4 不难发现, 不同回收模式下 CLSC 系统的均衡回收投入均为常值解, 均衡定价策略则是关于可回收利用率的反馈解. 具体地, 回收企业愿意通过固定资金投入以确保逆向物流的可持续, 以降低不确定性带来的风险; 制造商和零售商则依据可回收利用率的变化灵活调整产品定价. 如前所述, 废旧产品可回收利用率的高低依赖于回收企业在基础设施、技术研发及宣传管理等的资金投入效果, 这意味着尽管较高的可回收利用率能使制造商获得更多低成本的再制造原材料, 但回收环节的规模扩大势必加大运营成本, 故上游制造商倾向于提高批发价格来保障生产运营, 下游零售商则以零售价格优化引导消费者参与循环; 反之, 则通过价格信号动态平衡供需, 确保 CLSC 资源循环的流畅运转.

接下来, 将对不同情形下制造商与零售商的均衡策略、可利用率以及整个供应链系统的最优效用进行比较分析. 鉴于MM模型与MN模型均衡结果的一致性, 为便于论述, 下文选取MM模型作为分析对象.

命题 6 对比MM、RM、RN模型: 1) 无论零售商是成熟型还是幼稚型, 制造商回收模式下的回收投入、零售价格、可利用率以及 CLSC 系统最优效

用均高于零售商回收模式, 即 $\forall i \in \{M, N\}$, 有 $A^{MM} > A^{Ri}$ 、 $p^{MM} > p^{Ri}$ 、 $\tau^{MM} > \tau^{Ri}$ 和 $V_m^{MM}(\tau) + V_r^{MM}(\tau) > V_m^{RN}(\tau) + V_r^{RN}(\tau) > V_m^{RM}(\tau) + V_r^{RM}(\tau)$ 成立; 2) 只有当可回收利用率比值 $\frac{\sqrt{\tau^{MM}}}{\sqrt{\tau^{Ri}}}$ 不低于阈值 $\frac{a - b\Delta + 2be}{a - b\Delta}$ 时, 制造商回收模式下的批发价格才高于零售商回收, 即 $\omega^{MM} \geq \omega^{Ri}$.

命题 6 说明, 异质性时间偏好下无论零售商是成熟型还是幼稚型, 制造商回收始终是 CLSC 系统的最佳回收模式, 即制造商回收模式下整个供应链系统的最优效用始终高于零售商回收模式, 这与静态模型研究结论不同. 其原因是, 尽管零售商在回收环节更接近消费者, 但在动态模型中, 作为主导者的制造商负责回收, 能够更加灵活地整合上、下游信息, 并通过实时调整回收和定价策略应对可利用率的不确定性. 例如, 制造商可以依据历史回收数据优化再制造过程, 而在零售商回收模式下, 回收再利用的数据需要借助批发价格等间接信号传递, 这容易导致信息滞后、策略扭曲, 难以实现长期效用最优. 因此, 具有时间偏好一致性的制造商作为主导者, 其回收行为有助于 CLSC 系统的稳定和可持续发展.

4 数值分析

为了直观地揭示零售商时间偏好不一致性对产品定价、回收以及最优效用的影响规律, 分别对MM、RM、RN模型进行数值分析. 设市场需求系数 $a = 300$, $b = 30$, 可利用率初值 $\tau_0 = 0.1$, 衰减率 $\delta = 0.1$, 回收投入效果系数 $\gamma = 1$, 每单位回收废旧产品的残值 $\Delta = 4.5$, 回收补贴 $e = 4$, 回收成本系数 $k = 45838$, 贴现率 $\rho = 0.12$, 影响系数 $\sigma = 0.7$.

首先, 根据参数设定, 计算不同回收模式下产品批发价格和零售价格的稳态期望 (取 $i \in \{M, N\}$, $\beta \in \{0.1, 0.4, 0.7\}$ 以及 $\lambda \in \{0.1, 1, 10\}$, 见表 2); 然后, 保持其他参数不变并逐一改变 β 和 λ , 绘制出不同回收模式下可利用率期望随时间 t 的变化趋势 (见图 1 和图 2) 及不同模型间的最优效用差 (见图 3).

表2 β 和 λ 对产品定价策略稳态期望的影响

λ	β	制造商回收		零售商回收	
		$\mathbb{E}(\omega_{\infty}^{Mi})$	$\mathbb{E}(p_{\infty}^{Mi})$	$\mathbb{E}(\omega_{\infty}^{Ri})$	$\mathbb{E}(p_{\infty}^{Ri})$
$\lambda = 0.1$	0.1	0.3049	0.7069	0.2763	0.2610
	0.4	0.3049	0.7069	0.3117	0.2944
	0.7	0.3049	0.7069	0.3470	0.3277
$\lambda = 1$	0.1	0.3049	0.7069	0.1018	0.0962
	0.4	0.3049	0.7069	0.1963	0.1854
	0.7	0.3049	0.7069	0.2897	0.2736
$\lambda = 10$	0.1	0.3049	0.7069	0.0465	0.0439
	0.4	0.3049	0.7069	0.1598	0.1509
	0.7	0.3049	0.7069	0.2717	0.2566

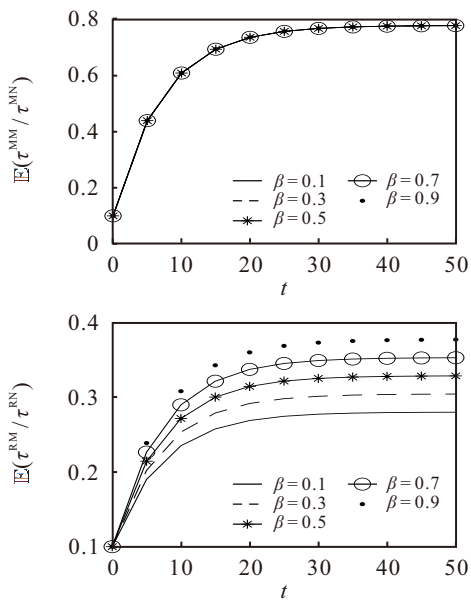


图1 β 对不同回收模式下可再利用率期望的影响

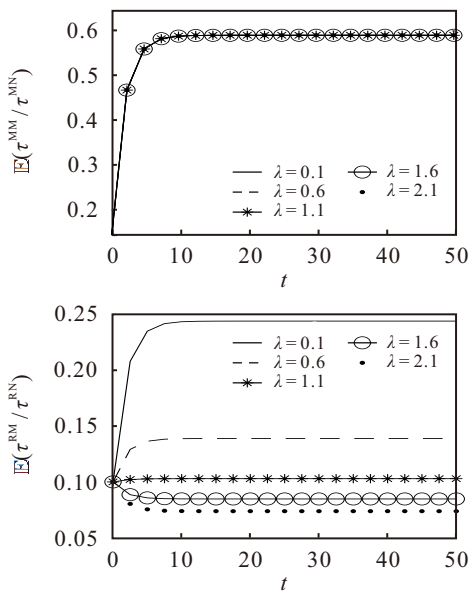


图2 λ 对不同回收模式下可再利用率期望的影响

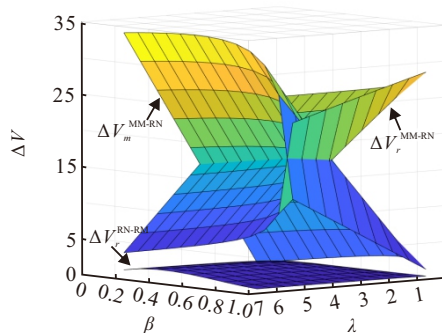


图3 β 和 λ 对最优效用差的影响

由表2可见,随着短期折扣系数 β 的增大和指数分布密度参数 λ 的减少,制造商回收模式下的产品批发价格和零售价格保持恒定,而零售商回收模式下的相应值则呈现上升趋势.这揭示,当时间偏好一致

的制造商作为回收活动的主导者时,制造商在回收过程中承担了更多的成本,降低了对价格调整的需求,进而使定价策略对 β 和 λ 的变化不敏感,保障了系统的稳定运行和发展.相对而言,当零售商负责回收时,内部运营成本的增加驱使制造商与零售商分别通过提升批发价格和零售价格补偿回收补贴和回收成本.随着短期折扣系数 β 的增大,零售商的现期偏好程度越低,其越倾向于通过提高价格获取未来收益.指数分布密度参数 λ 的增加,进一步强化这一趋势,即零售商预期未来市场将更有利可图,其愿意接受更高的批发价格以期在未来获得更大的回报.但从长远看,过高的价格可能导致消费者需求下降,对供应链系统的稳定性和可持续发展不利.因此,供应链系统在制定回收投入和定价策略时,需综合考虑成本、市场需求以及企业行为的影响.

图1和图2分别为不同 β 和 λ 设定下,制造商回收和零售商回收的可再利用率期望的变化趋势.不难发现,制造商回收的可再利用率期望不随 β 和 λ 变化,且保持一个相对稳定的水平,这与前文对比结果一致,反映了制造商在回收过程中的稳定性和可靠性.然而,零售商回收的可再利用率期望却与短期折扣系数 β 正相关,与指数分布密度参数 λ 负相关.具体地,当短期折扣系数 β 增大时,零售商更愿意长期提供回收服务以吸引消费者;当指数分布密度参数 λ 增大时,可再利用率期望呈现下降趋势,这是因为现期区间期望时长的缩短,导致废旧产品的回收成本与其收益在时间上存在错配,风险不确定性增加,从而降低了其废旧产品回收的积极性.

此外,在不同双曲折现因子设定下,制造商回收的可再利用率期望始终高于零售商回收,这进一步说明了制造商在回收体系中的优势地位.因此,针对时间偏好不一致的零售商,制造商可采取如下举措激励其选择制造商回收策略:1) 提供短期激励措施,如一次性奖励、返利,以平衡零售商对短期收益的偏好;2) 共享回收数据,使零售商更好地理解回收活动的长期价值,降低其短期偏好带来的非理性心理.

图3揭示了双曲折现因子对不同模型间系统成员的最优效用差的影响规律.在图3中: ΔV_m^{MM-RN} 和 ΔV_r^{MM-RN} 分别为MM模型与RN模型间制造商和零售商的最优效用差, ΔV_r^{RN-RM} 为RN模型与RM模型间零售商的最优效用差.观察图示可知, ΔV_m^{MM-RN} 和 ΔV_r^{MM-RN} 随 β 和 λ 的变化呈相反态势.具体地,随着短期折扣系数 β 的增大或指数分布密度参数 λ 减小,MM模型与RN模型间制造商的最优效

用差呈现下降趋势,而零售商的最优效用差则呈现上升趋势.换言之,当短期折扣系数增加或指数分布密度参数降低时,时间偏好一致的制造商在两种不同模型下的策略效果趋于接近,其策略选择的灵活性相对增强.对于零售商而言,双曲折现因子的变化却使其在不同模型下的策略效果差异变得更为显著,这归因于MM模型中成熟零售商较谨慎地依据相应时间偏好做决策.

另外, ΔV_r^{RN-RM} 随着短期折扣系数 β 的增大呈现先升后降的趋势,而随着指数分布密度参数 λ 的减小则持续呈现下降趋势.这表明,短期视角下当时间偏好不一致的零售商更看重当期收益时(即 β 较小),成熟零售商过度关注当期及未来各期的主观贴现,导致其在当期的决策过于保守而错失短期盈利机会,从而 ΔV_r^{RN-RM} 呈现上升趋势.一旦当零售商对长期收益的重视程度达到一定阈值时(即 β 超过某一临界点),成熟零售商和幼稚零售商在短期与长期收益间开始寻求平衡,此时,幼稚零售商的相对优势减弱,使得 ΔV_r^{RN-RM} 呈现递减趋势.

5 结论

闭环供应链的回收管理关乎环境、经济价值最大化的实现,现有研究大多基于理性人假设,鲜有对未来时段产品效用非理性估计的考量.本文考虑了由具有异质性时间偏好的制造商与零售商组成的 CLSC 系统,分析了 MM、MN、RM 以及 RN 模型下的回收决策制定及回收模式选择问题,探讨了零售商的时间偏好不一致性对产品定价、废旧产品回收以及最优效用的影响,并得出如下结论:

1) 制造商回收下,无论零售商是成熟型还是幼稚型,CLSC 系统的均衡回收投入、定价策略、可再利用率以及各成员效用均相同,即具有时间偏好一致性的制造商作为领导者,其回收行为有助于 CLSC 系统的稳定发展,且零售商的时间偏好不一致性不利于自身和整个供应链效用的获取.

2) 与制造商回收类似,无论是成熟零售商还是幼稚零售商负责回收,CLSC 系统的均衡回收投入、定价策略、可再利用率以及制造商效用均相同,但幼稚零售商的最优效用高于成熟零售商的相应值;较微弱的零售商时间偏好不一致性能促进回收投入、产品定价的提高以及效用的获取.

3) 不同于完全理性的静态模型研究,异质性时间偏好下无论零售商是成熟型还是幼稚型,制造商回收始终是 CLSC 系统的最佳回收模式.

未来,将探究异质性时间偏好下零售商主导 CLCS

系统的决策问题及同质性时间偏好下竞争 CLCS 系统的决策问题.

参考文献 (References)

- [1] Unitar. The global E-waste monitor 2024[EB/OL]. (2024-03-22)[2024-12-10]. <https://ewastemonitor.info>.
- [2] Savaskan R C, Bhattacharya S, Wassenhove L N V. Closed loop supply chain models with product remanufacturing[J]. *Management Science*, 2004, 50(2): 239-252.
- [3] 人民日报. 联合国机构呼吁应对电子垃圾急剧增长[EB/OL]. (2024-04-01)[2024-12-10]. https://paper.people.com.cn/rmrb/html/2024-04/01/nw.D110000renmr_20240401_2-16.htm. (People's daily. UN agencies call for response to the rapid growth of electronic waste[EB/OL]. (2024-04-01) [2024-12-10]. https://paper.people.com.cn/rmrb/html/2024-04/01/nw.D110000renmr_20240401_2-16.htm.)
- [4] 陈文洲, 高明, 陈玉珠. 考虑公平偏好的低值可回收物回收处置激励机制研究[J]. *控制与决策*, 2025, 40(2): 451-460. (Chen W Z, Gao M, Chen Y Z. Research on incentive mechanism of recycling and disposal of low-value waste materials considering fairness preference[J]. *Control and Decision*, 2025, 40(2): 451-460.)
- [5] Zhang Z Y, Yu L Y. Dynamic decision-making and coordination of low-carbon closed-loop supply chain considering different power structures and government double subsidy[J]. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 2023, 25: 143-171.
- [6] Taleizadeh A A, Moradi R, Vedadi-Moghaddam S, et al. A closed-loop supply chain with retail price, quality, marketing effort and return policy-induced demand under different decision-making scenarios[J]. *Supply Chain Finance Modelling and Optimization*, DOI: 10.1007/978-981-97-2359-1_6.
- [7] Meng Q F, Li M W, Liu W Y, et al. Pricing policies of dual-channel green supply chain: Considering government subsidies and consumers' dual preferences[J]. *Sustainable Production and Consumption*, 2021, 26: 1021-1030.
- [8] Giovanni P D, Zaccour G. Cost-revenue sharing in a closed-loop supply chain[J]. *Advances in Dynamic Games*, 2013, 12: 395-421.
- [9] Xiao J M, Huang Z S. A stochastic differential game in the closed-loop supply chain with third-party collecting and fairness concerns[J]. *Sustainability*, 2019, 11(8): 2241.
- [10] 马德青, 胡劲松. 具公平行为的零售商回收闭环供应链动态均衡策略研究[J]. *中国管理科学*, 2019, 27(4): 70-78. (Ma D Q, Hu J S. Study on dynamic equilibrium strategy of closed-loop supply chain with retailers' fair behavior and retailer recycling[J]. *Chinese Journal of Management Science*, 2019, 27(4): 70-78.)
- [11] 王道平, 梁思涵, 朱梦影. 考虑智能回收和声誉的闭环供应链决策研究[J]. *中国管理科学*, 2024, 32(10): 244-255. (Wang D P, Liang S H, Zhu M Y. Research on strategy of closed-loop supply chain considering smart recycling and goodwill[J]. *Chinese Journal of Management Science*, 2024, 32(10): 244-255.)

- [12] Benzion U, Rapoport A, Yagil J. Discount rates inferred from decisions: An experimental study[J]. *Management Science*, 1989, 35(3): 270-284.
- [13] Chapman G B. Temporal discounting and utility for health and money[J]. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory and Cognition*, 1996, 22(3): 771-791.
- [14] Harris C, Laibson D. Instantaneous gratification[J]. *The Quarterly Journal of Economics*, 2013, 128(1): 205-248.
- [15] 黄文礼, 高泽融, 吕柏霖, 等. 时间不一致性下消费金融公司的最优退出选择 —— 基于实物期权视角[J]. *系统工程理论与实践*, 2022, 42(8): 2102-2113. (Huang W L, Gao Z R, LV B L, et al. The optimal exit choice of consumer finance companies under time inconsistent preference-based on the perspective of real options[J]. *Systems Engineering – Theory & Practice*, 2022, 42(8): 2102-2113.)
- [16] 白雨, 赵昕, 丁黎黎. 考虑企业时间偏好的碳配额存储与借贷机制研究[J]. *中国管理科学*, 2025, 33(4): 1-13. (Bai Y, Zhao X, Ding L L. Research on chinese emission allowances storage and lending mechanism considering enterprise time preference[J]. *Chinese Journal of Management Science*, 2025, 33(4): 1-13.)
- [17] 电脑报. Apple 宣布: 2025 年将在电池中使用 100% 再生钴[EB/OL]. (2023-04-14)[2025-06-12]. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1763119798165144298&wfr=spider&for=pc>. (CPCW. Apple announces: 100% regenerated cobalt to be used in batteries by 2025[EB/OL]. (2023-04-14)[2025-06-12]. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1763119798165144298&wfr=spider&for=pc>.)
- [18] 中关村在线. 京东 618 开门红: 小米、华为等品牌超 50 款手机单品 1 小时成交额破千万[EB/OL]. (2024-06-02)[2024-12-12]. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1800761946440367653&wfr=spider&for=pc>. (ZOL. JD 618 has a good start: Over 50 models of phones from brands such as Xiaomi and Huawei exceeded 10 million yuan in sales within an hour[EB/OL]. (2024-06-02)[2024-12-12]. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1800761946440367653&wfr=spider&for=pc>.)
- [19] 新浪财经. 透视宁德时代换电生态: 交通强国战略下的绿色革命[EB/OL]. (2025-09-04)[2025-04-14]. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1829370333688779996&wfr=spider&for=pc>. (Sina finance. Perspective on the electricity exchange ecology in the Ningde Era: Green revolution under the strategy of building a strong transportation country[EB/OL]. (2025-09-04)[2025-04-14]. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1829370333688779996&wfr=spider&for=pc>.)
- [20] 看看新闻. 新能源车退役电池流入非正规渠道, 源头管理如何落实? [EB/OL]. (2025-01-17)[2025-02-16]. <https://cj.sina.com.cn/articles/view/6145283913/m16e499749020024era>. (KNEWS. Retired batteries from new energy vehicles are flowing into informal channels. How can source management be implemented?[EB/OL]. (2025-01-17)[2025-02-16]. <https://cj.sina.com.cn/articles/view/6145283913/m16e499749020024era>.)
- [21] 张川, 田雨鑫, 李灿灿. 碳限额与交易政策下电动汽车动力电池制造商梯次利用决策[J]. *控制与决策*, 2024, 39(6): 2051-2059. (Zhang C, Tian Y X, Li C C. Echelon utilization decision of an EV power battery manufacturer under carbon cap-and-trade policy[J]. *Control and Decision*, 2024, 39(6): 2051-2059.)
- [22] Yu H, Mi J J, Xu N. Recycling, pricing decisions, and coordination in the dual-channel closed-loop supply chain: A dynamic perspective[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2024, 456: 142297.
- [23] 黄宗盛, 聂佳佳, 胡培. 基于微分对策的再制造闭环供应链回收渠道选择策略[J]. *管理工程学报*, 2013, 27(3): 93-102. (Huang Z S, Nie J J, Hu P. Dynamic closed-loop supply chain models with product remanufacturing[J]. *Journal of Industrial Engineering/Engineering Management*, 2013, 27(3): 93-102.)
- [24] Klein C. Recycling rate of packaging in Japan in fiscal year 2022, by material[EB/OL]. (2024-10-01)[2025-06-12]. <https://www.statista.com/statistics/1182829/japan-recycling-rate-by-material/>.
- [25] 刘浪, 彭莲怡, 濮宇涛. 成本分担契约下具有双重参考效应的闭环供应链微分博弈[J]. *中国管理科学*, DOI: 10.16381/j.cnki.issn1003-207x.2023.0712. (Liu L, Peng L Y, Pu Y T. A closed-loop supply chain differential game with dual reference effects under cost-sharing contracts[J]. *Chinese Journal of Management Science*, DOI: 10.16381/j.cnki.issn1003-207x.2023.0712.)
- [26] 罗鹏飞, 杨招军. 成熟型企业家的投资策略与可转债的代理问题[J]. *控制理论与应用*, 2018, 35(3): 349-356. (Luo P F, Yang Z J. Investment policy and agency problem of convertible debt with sophisticated entrepreneur[J]. *Control Theory & Applications*, 2018, 35(3): 349-356.)
- [27] 马晓平, 刘志, 李帮义, 等. 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[J]. *控制与决策*, 2021, 36(6): 1489-1498. (Ma X P, Liu Z, Li B Y, et al. Game models of closed-loop supply chain under different warranty modes considering retailer's fairness concerns[J]. *Control and Decision*, 2021, 36(6): 1489-1498.)
- [28] Wang Y Y, Fan R J, Shen L, et al. Recycling decisions of low-carbon e-commerce closed-loop supply chain under government subsidy mechanism and altruistic preference[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 259: 120883.

作者简介

张浩男 (1986-), 男, 博士生, 主要研究方向为供应链系统决策优化, E-mail: zhanghaonan@hrbust.edu.cn;

于浚 (1987-), 女, 副教授, 博士, 主要研究方向为供应链系统决策优化、2-D 系统稳定性分析及控制, E-mail: huiyu@hrbust.edu.cn;

徐娜 (1987-), 女, 副教授, 博士, 主要研究方向为农产品供应链系统决策优化, E-mail: xnlucky_2012@163.com;

米佳晶 (1998-), 女, 博士生, 主要研究方向为闭环供应链系统决策优化, E-mail: 2120900002@stu.hrbust.edu.cn.