

生产者责任延伸制和信任偏好下回收策略

赵秀堃¹, 李冬冬¹, 杨芳芳¹, 徐芳超²

(1. 天津财经大学管理科学与工程学院, 天津 300222; 2. 南开大学商学院, 天津 300071)

摘要: 为了揭示生产者责任延伸制 (EPR) 和消费者信任偏好对闭环供应链各主体决策行为的影响, 建立由生产商、零售商、回收联盟和第三方回收商参与的 Stackelberg 博弈模型, 研究无 EPR 的生产商自主回收, 考虑 EPR 的联盟回收和考虑 EPR 的第三方回收三种模式下废旧电子产品回收决策问题. 结果表明, EPR 下消费者信任偏好程度与供应链利润和社会福利正相关; 随着消费者信任偏好程度增加, 零售商与生产商的利润差值减小; EPR 下联盟回收模式的供应链利润高于第三方回收模式; 两种 EPR 下回收模式的社会福利大于无 EPR 模式; 三种回收模式下生产商最优回收策略的社会福利最大. 因此, 政府应通过 EPR 激励生产商实施联盟回收, 引导消费者参与 EPR 实践, 以实现 EPR 和消费者信任偏好对企业回收行为的均衡引导.

关键词: 生产者责任延伸制; 信任偏好; 闭环供应链; 联盟回收; 第三方回收

中图分类号: F205 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-5781(2024)01-0091-18

doi: 10.13383/j.cnki.jse.2024.01.007

Recycling strategy in the presence of extended producer responsibility and trust preference

Zhao Xiukun¹, Li Dongdong¹, Yang Fangfang¹, Xu Fangchao²

(1. School of Management Science and Engineering, Tianjin University of Finance and Economics, Tianjin 300222, China; 2. Business School, Nankai University, Tianjin 300071, China)

Abstract: To reveal the influence of extended producer responsibility (EPR) and consumer trust preference on the decisions of members in a closed-loop supply chain, this paper establishes a Stackelberg game model involving the manufacturer, the retailer, the recycling alliance, and a third-party recycler to investigate the recycling decision of wasted electronics under three modes: independent recycling of the manufacturer without EPR, alliance recycling, and third-party recycling with EPR. The results show that the degree of consumer trust preference is positively related to the profit of the supply chain and the social welfare with EPR. Further, the difference between the profit of retailer and manufacturer decreases with consumer trust preference, and the profit of supply chain is higher in the alliance recycling mode than in the third-party recycling mode with EPR. The social welfare in both EPR modes is greater than in no-EPR mode. The optimal recycling strategy of the manufacturer achieves the maximum social welfare in all the three modes. Therefore, the government should provide incentives for the manufacturer to implement alliance recycling through EPR, and induce consumers to participate in EPR practice, so as to achieve a balance between EPR and consumer trust preference in guiding firms' recycling behavior.

Key words: extended producer responsibility; trust preference; closed-loop supply chain; alliance recycling; third-party recycling

收稿日期: 2022-05-18; 修订日期: 2023-06-16.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (71802143; 72002109; 71702021; 71972142); 教育部人文社会科学研究青年基金资助项目 (18YJC630260); 天津市研究生科研创新项目 (2022SKY345).

1 引言

随着全球绿色低碳竞争加剧,实现“碳中和”已成为各国经济发展中的重要议题.而再生资源和废旧产品的合理回收再利用是实现“碳中和”的有效途径^[1].国际电信联盟发布《2020年全球电子废弃物监测》报告指出,2030年全球电子废弃物将达到7400万t^[2].电子产品含有害金属,如不能妥善处理,将引发严重生态危机^[3].国际经合组织(OECD)2016年给出的《生产者责任延伸制(EPR):废弃物高效管理指引》^[4]中国2017年制定的《EPR推行方案》(下文简称“方案”)^[5]和2022年发布的《深化电子电器行业管理制度改革的意见》^[6]都在强调生产者主动承担回收责任的重要性,其要求生产者对其产品承担的资源环境责任从生产环节延伸到产品设计、流通、消费、回收利用及废物处置等全生命周期.在规范回收利用方面,世界自然基金会(WWF)的《政府和企业如何实施EPR》^[7]和方案均指出,生产企业可通过自主回收、联合回收或委托回收等模式,规范回收废弃产品,直接处置或由专业企业处置利用.如联想通过自主回收建立逆向物流系统,实施全面的闭环供应链管理,形成了无制度约束的自主回收模式.海尔加入山东省废旧电器回收联盟以履行回收责任,构建了生产商联盟回收模式.京东联合爱回收搭建废旧电子产品网络平台回收系统,通过线上线下全渠道为消费者提供回收服务,形成了基于互联网平台的第三方回收模式.完善的EPR政策对于企业废旧产品回收决策具有重要的引导意义.

尽管EPR相关政策不断完善,企业回收模式也不断规范化,但废旧电子产品回收率仍然较低^[8].在提高废旧电子产品回收率方面,OPPO、小米和戴尔等企业纷纷开展产品退换和以旧换新活动中,尤其注重消费者的信任偏好对产品回收的影响^[9,10].针对消费者信任偏好问题,市场研究机构YouGov对8000名消费者进行回收指数调查发现,83%认为回收系统易于使用时,他们将有意愿参与更多回收^[11].此外,通过对国内爱回收企业员工进行实际访谈也发现类似问题,虽然消费者选择爱回收,但无论在产品质量还是服务水平上,他们对于废旧电子产品的回收处理过程仍然保持怀疑态度.其中个人隐私数据泄露、翻新品以次充好和缺少关联配件等问题严重影响消费者回收废旧电子产品的意愿.以上国内外调研数据均表明消费者的信任偏好程度对有效回收废旧电子产品具有重要的影响作用.所以综合考虑EPR和消费者信任偏好影响下闭环供应链回收决策问题,对于完善我国EPR政策,规范企业回收模式,提高废旧电子产品回收率,取得更好的经济效益、环境效益和社会效益具有重要的现实意义.

基于以上背景,本文以闭环供应链中生产商为核心,探讨生产商自主回收、联盟回收和第三方回收模式下EPR和消费者信任偏好对闭环供应链回收决策的影响机制,具体问题如下:1)EPR和消费者信任偏好如何影响生产商回收决策?2)生产商如何有效利用消费者信任偏好来选择最优的回收模式?3)生产商如何在优化自身利益的同时与社会福利的提升保持一致性?

目前关于消费者信任偏好和绿色偏好的研究逐渐成熟.在信任偏好研究方面,如汪旭晖等^[12]探究了卖家生成内容对于消费者信任的影响,以及上述影响的边界条件与互补替代效应;Kurdhi等^[13]考虑在复杂环境中的消费者存在产品偏好行为的经验特征,探究企业在竞争环境中做出的战略选择.上述学者重点研究消费者信任偏好对企业决策的影响,还有学者基于绿色偏好对企业决策进行分析,如梁喜等^[14]在考虑消费者渠道信任偏好和低碳偏好的基础上,研究了企业最优定价决策与减排策略问题;刘侃莹等^[15]假设市场中存在对绿色产品有偏好差异的两类消费者,研究不同行为定价策略给绿色产品供应链带来的影响;Ping等^[16]探讨了消费者对碳排放和交货时间的双重敏感性对企业最优决策和利润的影响.从上述研究可知,消费者偏好对闭环供应链内部企业间的关系协调具有重要作用,这为本研究构建基于信任偏好的回收策略研究提供了理论基础.同以往研究相比,本文研究了EPR下考虑消费者信任偏好的回收策略问题,同时进一步探究了消费者信任偏好对企业利润和社会总福利的影响边界.

关于回收模式选择的相关研究主要有:卢荣花等^[17]分析了制造商回收和零售商回收模式下的最优定价问题;苏玲等^[18]构建制造商、零售商和第三方回收下的闭环供应链模型及无回收基础模型,分析闭环供应链

的定价决策及回收渠道选择;贾俊秀等^[19]以电池生产商为领导者,研究无政府补贴、电池生产商补贴和新能源汽车制造商补贴三种策略下供应链主体的最优决策问题;肖旦等^[20]考虑制造商和两个相互竞争回收商的竞合关系,分析闭环供应链成员在不同情形下的最优回收策略;康凯等^[21]考虑政府在市场与企业的双向介入与消费者驱动对回收策略的影响;赵强等^[22]指出消费者对废旧产品环境影响认知是影响废旧产品回收的关键因素;He 等^[23]基于消费者偏好分析,研究了竞争性回收和回收渠道便利性对企业回收再制造的影响;Isil 等^[24]分析了 EPR 政策下耐用品生产者的二级市场干预策略,并探究该策略对 EPR 环境绩效的影响;Feng 等^[25]考虑了消费者行为因素,研究单一线下回收渠道、在线回收渠道和混合回收渠道三种回收渠道的企业决策问题.从上述研究可以看出,虽然不同的回收策略在影响条件和作用机制上存在一定差异,但均强调了政府规制在闭环供应链回收决策中的重要作用,以及消费者偏好对供应链主体的回收行为的影响.这为本研究构建基于 EPR 和信任偏好的回收策略研究提供了重要理论依据.区别于目前已有研究,本文在探讨联盟回收模式的决策机制时,考虑了内化回收率情境;同时,本文进一步探究了 EPR 和信任偏好如何交互作用才能完善闭环供应链回收策略的相关问题.

本文研究内容主要有:从博弈视角构造了三种情景下博弈模型,以考虑 EPR 与否为源头,首先构造无 EPR 的生产商自主回收情境下的博弈模型,完成闭环供应链回收决策的基准博弈,形成以生产企业为核心的闭环供应链网络.以此为基础,依次拓展构建了考虑 EPR 的生产商联盟回收和考虑 EPR 的第三方回收情境下的博弈模型,每个模型中都突出了消费者信任偏好水平对产品需求的影响,进而形成三个情景下的企业利润和社会总福利.通过优化理论和博弈分析,得出不同情景下的最优解,并对关键结论进行均衡分析.利用数值仿真,分析消费者信任偏好水平和电子废物回收率对企业利润和社会福利的影响,为 EPR 下的生产企业闭环供应链运营提供决策参考,并相应提出促进废旧电子产品回收的有效措施.最后,对外生回收率假设进行拓展分析,内生联盟回收和第三方回收模式下的回收率,以验证主要结论的鲁棒性.

基于上述研究内容,本文的创新点主要有三个:一是模型构建上,基于 EPR 和消费者信任偏好构建无 EPR 的生产商自主回收,考虑 EPR 的联盟回收和考虑 EPR 的第三方回收三种不同情景下的闭环供应链回收决策博弈模型,综合研究 EPR 和消费者信任偏好对回收决策影响;二是剖析消费者信任偏好对生产商回收模式选择和利润的影响,以及分析消费者信任偏好对供应链整体利润和社会福利的影响,还进一步通过内化回收率探究最优决策的稳定性,这与以往 EPR 政策对回收模型和企业利润的影响研究不同;三是在确立消费者信任偏好对企业利润和社会总福利影响的边界条件下,探讨生产商优化自身利益和政府实现社会总福利的一致性.

2 问题描述与研究假设

考虑 EPR 和消费者信任偏好对闭环供应链回收决策的影响问题,本文构建了由生产商,零售商,回收联盟和第三方回收商构成的三种情景下回收决策模式,即无 EPR 的生产商自主回收模式,考虑 EPR 的联盟回收模式和考虑 EPR 的第三方回收模式.生产商生产新产品,并以批发价格 ω_i ($i = 1, 2, 3$ 分别对应三种回收模式) 批发给零售商,零售商以销售价格 p_i 出售给消费者,设 c_m 为生产新产品的成本, r 为产品回收率, δ 为电子废弃物的单位回收收入,为便于关键问题分析,假设三种模式下的单位回收收入相同.三种回收模式的市场需求和成本结构假设如下:

1) 无 EPR 的生产商自主回收模式.在前文提到的联想自主回收模式中,企业回收废旧电子产品是一种自发行为.在没有 EPR 相关制度约束下,为了经济效益和社会责任,联想依然会选择开展回收活动.作为基准模式,因为考虑到方便主要假设的依次拓展和三种模式下模型的对比分析,突出 EPR 的非强制性和消费者信任偏好的差异性,强调 EPR 和消费者信任偏好对闭环供应链回收决策的综合影响,所以忽略了 EPR 对生产商决策的直接影响.尤其不受回收能力约束的生产商,为了节约制度遵守成本,往往会将无 EPR 的自主回收模式作为理性选择.假设该模式下新电子产品的市场需求函数为 $q_1 = 1 - p_1$,生产商对废旧电子产品

的单位回收成本为 c_p , 对废旧电子产品的单位处置成本为 d_p , 废旧电子产品回收率 r 为外生变量. 为了突出无 EPR 的生产商自主回收模型下企业回收决策对社会总福利的影响, 假设社会总福利由供应链整体利润、消费者剩余和环境改善程度组成. 其中消费者剩余 $CS_1 = (\hat{p}_1 - p_1)q_1/2$, \hat{p}_1 表示无 EPR 的生产商自主回收模式下消费者愿意支付的最高价格. 环境改善程度 EI_1 为回收量与绿色改进度的乘积 (文献^[26] 有类似假设), 强调企业额外付出的行为所产生的环境影响, 突出相对改善程度. 因为该模式下生产商不存在额外的回收努力, 即绿色改进程度为零, 所以无 EPR 的生产商自主回收模式下的 $EI_1 = 0$. 具体流程如图 1 所示, 其中生产商和零售商以利润最大化为目标, 生产商是领导者, 零售商是从属者.

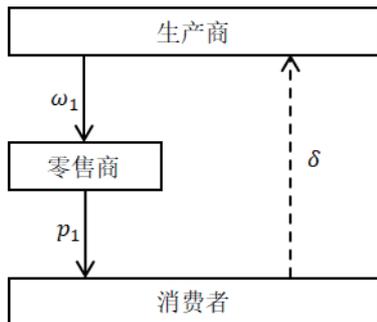


图 1 无 EPR 的生产商自主回收模式

Fig. 1 Independent recycling without EPR

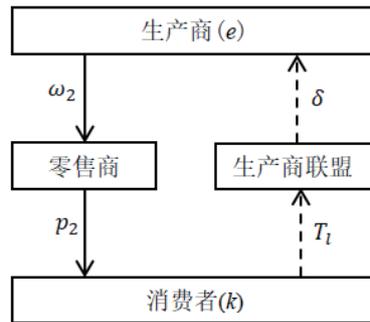


图 2 考虑 EPR 的联盟回收模式

Fig. 2 Alliance recycling with EPR

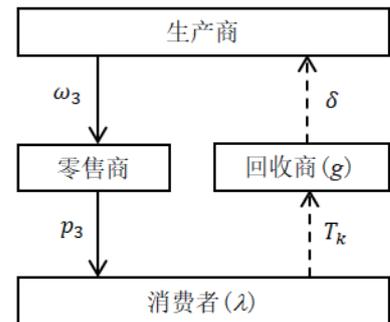


图 3 考虑 EPR 的第三方回收模式

Fig. 3 Third-party recycling with EPR

由图 1 可知, 在没有政府 EPR 规制下, 生产企业自主回收的利润主要取决于新产品批发价格, 单位生产成本, 单位回收收入, 单位回收成本, 单位处理成本, 回收率以及市场需求, 与消费者的信任偏好没有关系. 该模式下假设企业可以不考虑 EPR 政策对自身回收行为以及消费者信任偏好的影响, 所以市场需求只取决于产品的价格. 但现实中企业无法避免 EPR 政策和消费者信任偏好对自身决策行为的影响, 所以为了保证主要结论的鲁棒性, 本文进一步拓展了该模式下较强的假设, 突出 EPR 和消费者信任偏好对生产商回收决策的综合影响作用. 由此, 形成以下考虑 EPR 的生产商联盟回收和考虑 EPR 的第三方回收两种模式的研究假设及相关决策.

2) 考虑 EPR 的联盟回收模式. 该模式下 EPR 作为一种激励性制度, 推动受回收能力约束的生产企业参与到废旧电子产品的回收管理中, 形成考虑 EPR 的联盟回收模式. 如前文中的海尔企业, 在 EPR 政策激励下, 通过联盟回收模式履行自己产品的回收责任. 假设新电子产品需求函数为 $q_2 = 1 - p_2 + ke$ (文献^[27,28] 有类似假设). 其中 e 为遵守 EPR 的生产商加入联盟后所需要付出的努力水平, 如生产商为提高回收率所做的生态设计或广告投入, 由此产生了一定的总投入成本 e^2 (文献^[26] 有类似假设), 生产商努力水平的提高有利于消费者信任水平的提升, 进而提高新产品市场需求和废旧产品回收量, 其中废旧电子产品回收率 r 为外生变量. k 表示消费者对考虑 EPR 的联盟回收模式的信任偏好程度, 为保证利润函数的凹性, 信任偏好系数取值范围为 $0 < k < 2\sqrt{2}$ (证明见附录 1). k 的存在代表政府通过 EPR 政策引导生产企业付出回收努力进而正向影响消费者的信任偏好程度. 此外, 生产商联盟负责废旧品的回收和处置, $c_l d_l$ 分别是联盟对废旧电子产品的单位回收成本以及单位处置成本, T_l 为生产商支付给联盟的回收处置费用, 为保证联盟盈利, 假设 $T_l > c_l + d_l$. 同理为了突出考虑 EPR 的联盟回收决策对社会总福利的影响, 假设该模式下社会总福利同样由供应链利润、消费者剩余和环境改善程度构成. 其中消费者剩余 $CS_2 = (\hat{p}_2 - p_2)q_2/2$, \hat{p}_2 表示考虑 EPR 的联盟回收模式下消费者愿意支付的最高价格. 因为该模式下生产商存在回收努力, 所以考虑 EPR 的联盟回收模式的环境改善程度 $EI_2 = erq_2$. 具体流程如图 2 所示, 其中生产商是主导者, 零售商是从属者. 生产商决策回收努力水平和批发价格, 零售商决策销售价格, 生产商联盟不参与决策 (生产商联盟内化废旧电子产品回收率的决策分析见论文拓展部分).

3) 考虑 EPR 的第三方回收模式. 同理, 该模式下 EPR 作为一种激励性制度, 很多依托互联网平台的第三方回收商, 以规范的回收流程和专业的数据处理技术, 成为很多生产商的战略合作伙伴, 如京东投资下的爱回收第三方回收平台是考虑 EPR 的第三方回收模式典型代表. 假设新电子产品需求函数为 $q_3 = 1 - p_3 + \lambda g$. 其中 g 为遵守 EPR 的第三方回收商所需要投入的专业技术水平, 如第三方回收商为提高废旧电子产品回收率所做的数据安全承诺, 由此产生了一定的总投入成本 g^2 , 第三方回收商专业技术水平的提高有利于消费者信任水平的提升, 进而提高新电子产品市场需求和废旧电子产品回收量, 其中废旧电子产品回收率 r 为外生变量. λ 表示消费者对考虑 EPR 的第三方回收模式的信任偏好水平, λ 的存在代表政府通过 EPR 政策引导生产企业委托具有专业技术水平的第三方回收商投入更多的技术而正向影响消费者的信任偏好程度. 此外, 第三方回收商负责废旧电子产品的回收和处置, c_k 和 d_k 分别是第三方回收商对废旧电子的单位回收成本以及单位处置成本, T_k 为生产商支付给第三方回收商的回收处置费用, 为保证第三方回收商盈利, 假设 $T_k > c_k + d_k$. 同理为了突出考虑 EPR 的第三方回收决策对社会总福利的影响, 假设该模式下社会总福利构成与上述两种模式一样, 其中消费者剩余 $CS_3 = (\hat{p}_3 - p_3)q_3/2$, \hat{p}_3 表示考虑 EPR 的第三方回收模式下消费者愿意支付的最高价格. 其环境改善程度 $EI_3 = grq_3$. 具体流程如图 3 所示, 其中回收商是主导者, 生产商和零售商是从属者. 生产商、零售商和第三方回收商以利润最大化为目标, 回收商决策投入的专业回收技术水平, 以提高消费者信任偏好程度. 此外, 为了突出消费者信任偏好程度在不同情景下的差异性, 假设 $\lambda \neq k$ (回收商内化废旧电子产品回收率的决策分析见论文拓展部分).

本文所用到的符号及变量如表 1 所示.

表 1 符号及定义
Table 1 Symbols and definitions

符号	定义	符号	定义
ω_i	生产商的批发价格 ($i = 1, 2, 3$)	c_k	第三方的单位回收成本
p_i	新电子产品的销售价格 ($i = 1, 2, 3$)	d_k	第三方的单位处置成本
c_m	生产新电子产品的成本	T_l	支付给联盟的单位回收处置费用
r	废旧电子产品回收率	T_k	支付给第三方的单位回收处置费用
c_p	生产商的单位回收成本	e	生产商联盟的回收努力水平
d_p	生产商的单位处置成本	k	消费者对联盟回收的信任偏好程度
q_i	新电子产品需求量 ($i = 1, 2, 3$)	g	第三方企业的专业技术水平
δ	废旧电子产品的单位回收收入	λ	消费者对第三方回收的信任偏好程度
c_l	联盟的单位回收成本	π_M^j	生产商的利润 ($j = 1, 2, 3$)
d_l	联盟的单位处置成本	π_R^j	零售商的利润 ($j = 1, 2, 3$)
π_K^i	第三方企业的利润 ($i = 3, 2r$)	π_L^i	生产商联盟的利润 ($i = 2, r$)
CS_i	消费者剩余 ($i = 1, 2, 3$)	EI_i	环境改善程度 ($i = 1, 2, 3$)
SW_i	社会福利 ($i = 1, 2, 3$)		

注: 其中 $i = r, 2r$ 分别对应联盟回收和第三方回收模式下的回收率

3 利润函数构建

3.1 无 EPR 的生产商自主回收情境

在无 EPR 的生产商自主回收模式中, 由生产商, 零售商和消费者构成闭环供应链系统. 首先, 在给定废旧电子产品回收率条件下, 生产商决策批发价格; 其次, 零售商通过批发价格决策销售价格; 最后, 生产商回收废旧电子产品. 此时零售商和生产商的利润函数分别为

零售商的利润函数

$$\pi_R^1 = (p_1 - \omega_1)(1 - p_1), \quad (1)$$

生产商的利润函数

$$\pi_M^1 = (\omega_1 - c_m + r\delta - rc_p - rd_p)(1 - p_1), \quad (2)$$

此时, 社会福利函数为

$$SW_1 = \pi_M^1 + \pi_R^1 + CS_1 + EI_1. \quad (3)$$

其中式(1)右端表示零售商销售电子产品获得的总利润, 式(2)右端表示生产商生产新电子产品和回收废旧电子产品获得的总利润, 式(3)右端表示由供应链整体利润、消费者剩余与环境改善程度构成的社会福利.

3.2 考虑EPR的生产商联盟回收情境

在考虑EPR的生产商联盟回收模式中, 由生产商、零售商、生产商联盟和消费者构成闭环供应链系统. 首先, 生产商决定批发价格和因遵守EPR而付出的努力水平; 其次, 零售商决策销售价格; 最后, 在给定废旧电子产品回收率条件下, 生产商联盟回收废旧电子产品并转售给生产商. 此时零售商, 生产商和生产商联盟的利润函数分别为

零售商的利润函数

$$\pi_R^2 = (p_2 - \omega_2)(1 - p_2 + ke), \quad (4)$$

生产商的利润函数

$$\pi_M^2 = (\omega_2 - c_m + r\delta - rT_l)(1 - p_2 + ke) - e^2, \quad (5)$$

生产商联盟的利润函数

$$\pi_L^2 = r(T_l - c_l - d_l)(1 - p_2 + ke), \quad (6)$$

此时, 社会福利函数为

$$SW_2 = \pi_M^2 + \pi_R^2 + \pi_L^2 + CS_2 + EI_2. \quad (7)$$

其中式(4)右端表示零售商销售新电子产品获得的总利润, 式(5)右端第一项表示生产商生产新电子产品和回收废旧电子产品获得的总利润, 第二项为提高废弃电子产品回收水平进行研发投入的成本, 式(6)右端表示生产商联盟进行废弃电子产品回收获得的总利润, 式(7)右端表示由供应链整体利润、消费者剩余与环境改善程度构成的社会福利.

3.3 考虑EPR的第三方回收商回收情境

在考虑EPR的第三方回收商回收模式中, 由生产商、零售商、回收商和消费者构成闭环供应链系统. 首先, 在给定废旧电子产品回收率条件下, 回收商决策因遵守EPR而投入的专业技术水平, 回收废旧电子产品转售给生产商; 其次, 生产商决定批发价格; 最后, 零售商决策销售价格. 此时零售商, 生产商和回收商的利润函数分别为

零售商的利润函数

$$\pi_R^3 = (p_3 - \omega_3)(1 - p_3 + \lambda g), \quad (8)$$

生产商的利润函数

$$\pi_M^3 = (\omega_3 - c_m + r\delta - rT_k)(1 - p_3 + \lambda g), \quad (9)$$

回收商的利润函数

$$\pi_K^3 = r(T_k - c_k - d_k)(1 - p_3 + \lambda g) - g^2, \quad (10)$$

此时, 社会福利函数为

$$SW_3 = \pi_M^3 + \pi_R^3 + \pi_K^3 + CS_3 + EI_3. \quad (11)$$

其中式(8)右端表示零售商销售新电子产品获得的总利润, 式(9)右端表示生产商生产新电子和回收废旧电子产品获得的总利润, 式(10)右端第一项表示第三方回收商进行废旧电子产品回收获得的总利润, 第二项为提

高专业技术水平进行研发投入的成本, 式(10)右端表示由供应链整体利润消费者剩余与环境改善程度构成的社会福利。

4 最优解及均衡分析

在考虑 EPR 和消费者信任偏好的闭环供应链回收决策系统中, 无 EPR 的生产商自主回收和考虑 EPR 的联盟回收模式均是生产商参与的回收模式, 所以前两种模式下, 生产商为领导者, 零售商跟随者; 在考虑 EPR 的第三方回收模式中, 生产商委托第三方回收商进行回收, 所以回收商为领导者, 生产商与零售商为跟随者。基于此, 通过 Stackelberg 博弈的逆向归纳求解法, 本文得到三种模式下的最优解和最优利润, 如表 2 所示。本文所有性质命题和定理的证明将在附录中给出。

表 2 三种模式最优解和最优利润
Table 2 Optimal solutions and optimal profits of three modes

模式	最优解	最优利润
无 EPR 的生产商自主回收	$\omega_1^* = \frac{1+c_m-r\delta+rc_p+rd_p}{2};$ $p_1^* = \frac{3+c_m-r\delta+rc_p+rd_p}{2};$ $q_1^* = \frac{1-c_m+r\delta-rc_p-rd_p}{4};$	$\pi_R^{1*} = \frac{(1-c_m+r\delta-rc_p-rd_p)^2}{16};$ $\pi_M^{1*} = \frac{(1-c_m+r\delta-rc_p-rd_p)^2}{8};$ $SW_1^* = \frac{7(1-c_m+r\delta-rc_p-rd_p)^2}{32};$
考虑 EPR 的联盟回收	$\omega_2^* = \frac{(4-k^2)(rT_l-r\delta+c_m)+4}{8-k^2};$ $p_2^* = \frac{(2-k^2)(rT_l-r\delta+c_m)+6}{8-k^2};$ $q_2^* = \frac{2(1-rT_l+r\delta-c_m)}{8-k^2};$ $e_2^* = \frac{k(1-rT_l+r\delta-c_m)}{8-k^2};$	$\pi_R^{2*} = \frac{4(1-rT_l+r\delta-c_m)^2}{(8-k^2)^2};$ $\pi_M^{2*} = \frac{(1-rT_l+r\delta-c_m)^2}{8-k^2};$ $\pi_L^{2*} = \frac{2r(T_l-c_l-d_l)(1-rT_l+r\delta-c_m)}{8-k^2};$ $SW_2^* = \frac{(1-rT_l+r\delta-c_m)^2(2(rk+3)+(1+rT_l+r\delta-c_m-2rc_l-2rd_l)^2)}{(8-k^2)^2};$
考虑 EPR 的第三方回收	$\omega_3^* = \frac{r(\lambda^2+8)T_k-\lambda^2r(c_k+d_k)+8(1+c_m+r\delta)}{16};$ $p_3^* = \frac{r(3\lambda^2+8)T_k-3\lambda^2r(c_k+d_k)+8(3+c_m+r\delta)}{32};$ $q_3^* = \frac{r(\lambda^2-8)T_k-\lambda^2r(c_k+d_k)+8(1-c_m+r\delta)}{32};$ $g_3^* = \frac{\lambda r}{8}(T_k-c_k-d_k);$	$\pi_R^{3*} = \frac{(r(\lambda^2-8)T_k-\lambda^2r(c_k+d_k)+8(1-c_m+r\delta))^2}{1024};$ $\pi_M^{3*} = \frac{(r(\lambda^2-8)T_k-\lambda^2r(c_k+d_k)+8(1-c_m+r\delta))^2}{32};$ $\pi_K^{3*} = \frac{r(T_k-c_k-d_k)(r(\lambda^2-8)T_k-\lambda^2r(c_k+d_k)+8(1-c_m+r\delta))}{32};$ $SW_3^* = \frac{\lambda^2r^2(T_k-c_k-d_k)^2}{64} + \frac{7(r(\lambda^2-8)T_k-\lambda^2r(c_k+d_k)+8(1-c_m+r\delta))^2}{2048} + \frac{r(\lambda^2-8)T_k-\lambda^2r(c_k+d_k)+8(1-c_m+r\delta)}{32}(T_k-c_k-d_k) \times \left(1 + \frac{\lambda r}{8}\right)r - \frac{\lambda^2r^2}{64}(T_k-c_k-d_k)^2.$

命题 1 无 EPR 的生产商自主回收模式下, 闭环供应链存在最优批发价格 ω_1^* , 最优销售价格 p_1^* , 最优产量 q_1^* , 零售商的最优利润 π_R^{1*} , 生产商的最优利润 π_M^{1*} , 最优社会福利 SW_1^* 。

由命题 1 可知: 无 EPR 的生产商自主回收模式下, 闭环供应链的最优批发价格 ω_1^* 、最优销售价格 p_1^* 、最优产量 q_1^* 、最优利润和社会福利受到生产新电子产品的成本 c_m 、废旧电子产品的回收率 r 、单位回收收入 δ 、生产商的单位回收成本 c_p 等参数影响。

命题 2 考虑 EPR 的联盟回收模式下, 由联盟负责对废旧电子产品的回收和处置, 闭环供应链存在最优批发价格 ω_2^* , 最优销售价格 p_2^* , 最优产量 q_2^* , 最优回收努力水平 e_2^* , 零售商的最优利润 π_R^{2*} , 生产商的最优利润 π_M^{2*} , 联盟的最优利润 π_L^{2*} , 最优社会福利 SW_2^* 。

由命题 2 可知: 与无 EPR 的生产商自主回收模式相比, 在考虑 EPR 的联盟回收情境下的闭环供应链最优批发价格 ω_2^* 、最优销售价格 p_2^* 、最优产量、最优利润、社会福利和最优回收努力水平 e_2^* 、与消费者对联盟回收的信任偏好程度 k 以及支付给联盟的处置费用 T_l 直接相关; 由均衡值的表达式可以看出, 对联盟的信任偏好 k 对闭环供应链定价与利润的影响是非线性的。

命题 3 考虑 EPR 的第三方回收模式下, 第三方企业承担回收过程的所有责任, 闭环供应链存在均衡解, 均衡策略为: 最优批发价格 ω_3^* , 最优销售价格 p_3^* , 最优产量 q_3^* , 最优技术水平 g_3^* , 零售商最优利润 π_R^{3*} , 生产商的最优利润 π_M^{3*} , 第三方企业的最优利润 π_K^{3*} , 最优社会福利 SW_3^* 。

由命题 3 可知: 与无 **EPR** 的生产商自主回收模式相比, 在考虑 **EPR** 的第三方回收情境下的闭环供应链最优批发价格 ω_3^* 、最优销售价格 p_3^* 、最优产量最优利润、社会福利和最优技术水平 g_3^* 还与消费者对第三方回收的信任偏好程度 λ 以及支付给第三方的处置费用 T_k 直接相关; 由均衡值的表达式可以看出, 对第三方的信任偏好 λ 对闭环供应链定价与利润决策的影响是非线性的。

通过进一步分析以上命题 1~命题 3, 可得以下性质。

性质 1 $\pi_M^{1*} = 2\pi_R^{1*}$, $\pi_M^{3*} = 2\pi_R^{3*}$, $\pi_M^{2*} = \frac{8-k^2}{4}\pi_R^{2*}$.

性质 1 表明, 在不同回收模式中, 生产商自身获得的利润高于其他企业. 同时生产商与零售商的利润存在比例关系. 在无 **EPR** 的生产商自主回收和考虑 **EPR** 的第三方回收模式下, 生产商利润均是零售商利润的两倍; 在考虑 **EPR** 的联盟回收模式下, 生产商与零售商的利润差值取决于消费者对联盟回收的信任偏好程度 k , 随着消费者信任偏好程度增大, 零售商与生产商的利润差值逐渐减小. 因此, 在实际中对生产商而言, 应该主动承担废旧电子产品的回收责任, 通过产品设计优化回收系统, 提高消费者回收信心. 同时与零售商建立回收网络, 共同提高废旧电子产品回收率. 对零售商而言, 可以利用自身渠道优势, 提升消费者对联盟回收模式的信任偏好程度, 进而提高供应链整体利润和社会总福利。

性质 2 在考虑 **EPR** 的联盟回收模式中, 批发价格 ω_2^* 、销售价格 p_2^* 与消费者对联盟回收的信任偏好系数 k 呈负相关, 需求量努力水平以及各成员的利润社会福利与 k 呈正相关; 在考虑 **EPR** 的第三方回收模式中, 批发价 ω_3^* 、销售价 p_3^* 、专业技术水平 g_3^* 、各成员的利润及社会福利均与消费者信任偏好系数 λ 呈正相关。

性质 2 表明, 在考虑 **EPR** 联盟回收模式下, 随着消费者对联盟回收的信任偏好程度 k 增大, 生产商和零售商会分别降低批发价格和销售价格, 进而增大新产品需求量和废旧产品回收量. 此时生产商回收努力水平以及生产商和零售商的利润及社会福利均会增大; 在考虑 **EPR** 的第三方回收模式中, 随着消费者对第三方企业信任偏好程度的增加, 第三方回收商会提高专业技术水平, 进而提高供应链整体利润和社会总福利. 因此, 生产商可以提高对回收联盟的投入水平, 如资金技术广告和人才等关键要素的投入, 增加消费者对联盟回收的信任偏好程度, 提高消费者回收意愿, 促进废旧电子产品的有效回收. 同时第三方回收企业可以利用互联网平台优势, 进一步提高回收服务水平, 优化回收系统, 增强消费者对第三方回收的信任偏好程度, 进而获得更大收益和更多的社会福利。

性质 3 每种模式下新电子产品批发价格 ω 和销售价格 p 均与废旧电子产品回收率 r 呈负相关, 联盟努力水平、第三方回收技术水平以及供应链利润与废旧电子产品回收率 r 呈正相关。

性质 3 表明, 在三种模式下, 生产商和零售商会通过降低价格来提高新产品需求量进而增大废旧电子产品回收量. 随着废旧电子产品回收率的增大, 生产商联盟会付出更多的回收努力, 同时第三方回收商也会进一步提高专业技术水平, 以获得更多的废旧产品, 增加企业利润. 因此, 政府可以通过推广宣传 **EPR** 政策, 增强消费者环保意识, 提高消费者对废旧电子产品的回收意愿. 随着政府 **EPR** 规制体系的逐渐完善, 消费者对回收服务的信任偏好程度不断提高, 生产商可以提高自身产品的回收率, 优化自身利益的同时, 提升社会总福利。

5 数值分析

5.1 回收策略分析

在生产者责任延伸制的激励和约束下, 为了最大化经济利润并履行环境责任, 作为回收主体的生产商如何选择合适的回收模式变得至关重要. 依据命题 1~命题 3, 将针对三种情境下的生产商最优利润进行对比分析, 从生产商立场分析回收模式的选择和决策机制。

推论 1 当 $k \geq \max\left(\sqrt{\frac{8(A-B)}{A}}, \sqrt{\frac{8C-512B}{C}}\right)$ 时, 对生产商而言, 联盟回收模式最优; 当 $\lambda \geq$

$\max\left(\sqrt{\frac{8E}{F}}, \sqrt{\frac{16\sqrt{2B}-8D\sqrt{8-k^2}}{rF\sqrt{8-k^2}}}\right)$ 时, 对生产商而言, 第三方回收模式最优; 当 $k < \sqrt{\frac{8(A-B)}{A}}$ 且 $\lambda < \sqrt{\frac{8E}{F}}$ 时, 对生产商而言, 自营回收模式最优. 其中, $A = (1 - c_m + r\delta - rc_p - rd_p)^2$, $B = (1 - rT_l - r\delta - c_m)^2$, $C = (r(\lambda^2 - 8)T_k - \lambda^2r(c_k + d_k) + 8(1 - c_m + r\delta))^2$, $D = 1 - c_m + r\delta - rT_k$, $E = T_k - c_p - d_p$, $F = T_k - c_k - d_k$.

推论 1 说明, 在受 EPR 约束的情况下, 不同模式下生产商利润大小不是固定不变的, 随着消费者对联盟回收的信任偏好系数 k 以及对第三方回收的偏好系数 λ 的变化而变化. 当 $k \geq \max\left(\sqrt{\frac{8(A-B)}{A}}, \sqrt{\frac{8C-512B}{C}}\right)$, 即消费者对联盟回收的信任偏好足够大时, 此时生产商选择联盟回收模式获得最大收益; 当 $\lambda \geq \max\left(\sqrt{\frac{8E}{F}}, \sqrt{\frac{16\sqrt{2B}-8D\sqrt{8-k^2}}{rF\sqrt{8-k^2}}}\right)$, 即消费者第三方回收的偏好足够大时, 此时生产商最佳选择是第三方回收模式; 当 $k < \sqrt{\frac{8(A-B)}{A}}$ 且 $\lambda < \sqrt{\frac{8E}{F}}$, 即消费者对联盟回收和第三方回收模式的偏好程度都不高时, 生产商此时会选择自主回收.

推论 2 ① 当 $k^2 > S_1$, $\omega_1^* < \omega_3^* < \omega_2^*$; ② 当 $S_2 \leq k^2 \leq S_1$, $\omega_1^* \leq \omega_2^* \leq \omega_3^*$; ③ 当 $k^2 < S_2$, $\omega_2^* < \omega_1^* < \omega_3^*$. 其中, $S_1 = \frac{\lambda^2(8-k^2)r(T_k-c_k-d_k)+64r(T_k-T_l)}{8(1-c_m+r\delta+rT_k-2rT_l)}$, $S_2 = \frac{8r(T_l-c_p-d_p)}{2rT_l-r\delta+c_m-rc_p-rd_p-1}$.

推论 2 表明, 不同模式下最优批发价格大小受消费者对联盟回收的信任偏好系数 k 的影响. 当 $k^2 > S_1$ 时, 联盟回收的批发价格最高, 第三方回收次之; 当 $S_2 \leq k^2 \leq S_1$ 时, 第三方回收的批发价格最高, 生产商回收的批发价格最低; 当 $k^2 < S_2$ 时, 第三方回收的批发价格最高, 联盟回收回收的批发价格最低. 可观察到联盟回收模式中的批发价格 ω_2^* 与消费者的信任偏好系数 k 的二次方成正比, 即当消费者对联盟回收的信任偏好程度越强时, 生产商便会提高价格以获得更多的利润, k^2 足够大时, 在三种模式中联盟回收的批发价格最大. 另外, 无论何种情况, 第三方回收模式下的批发价格都要大于生产商回收模式, 这是因为在与第三方企业协商并签订合同时会产生更多的交易成本, 生产商此时会提高批发价格来弥补.

推论 3 ① 当 $k^2 > S_3$, $p_1^* < p_3^* < p_2^*$; ② 当 $S_4 \leq k^2 \leq S_3$, $p_1^* \leq p_2^* \leq p_3^*$; ③ 当 $k^2 < S_4$, $p_2^* < p_1^* < p_3^*$. 其中, $S_3 = \frac{3\lambda^2(8-k^2)r(T_k-c_k-d_k)+64r(T_k-T_l)}{8(rT_k+3-4rT_l+3r\delta-3c_m)}$, $S_4 = \frac{8r(T_l-c_p-d_p)}{4rT_l-3r\delta+3c_m-rc_p-rd_p-3}$.

推论 3 表明, 消费者对联盟回收的信任偏好系数 k 对最优销售价格也产生重要影响. 当 $k^2 > S_3$ 时, 联盟回收的销售价格最高, 第三方回收的销售价格次之; 当 $S_4 \leq k^2 \leq S_3$ 时, 第三方回收的销售价格最高, 生产商回收的销售价格最低; 当 $k^2 < S_4$ 时, 第三方回收的销售价格最高, 联盟回收的销售价格最低. 与批发价格大小受信任偏好系数 k 的影响趋势一致, 在联盟回收模式中的销售价格 p_2^* 与消费者信任偏好程度 k 的二次方成正比. 一方面, 当消费者对联盟回收的信任偏好程度增大时, 零售商会提高新电子产品销售价格以获得更大的利润; 另一方面, 生产商的批发价格也会随着消费者对联盟回收信任偏好程度的增大而增大, 零售商自然会提高新电子产品销售价格以保持竞争力.

5.2 消费者的信任偏好程度和回收率对供应链利润和社会福利的影响分析

通过以上对于考虑 EPR 和消费者信任偏好的闭环供应链回收决策的研究, 发现生产商零售商利润和社会福利与消费者对联盟回收的信任偏好程度 k , 对第三方回收的信任偏好程度 λ 和回收率 r 密切相关. 为了进一步探究消费者信任偏好和电子废弃物回收率对企业利润和社会福利的影响机制, 并对重点结论进行鲁棒性分析, 本文将依次对 k , λ 以及 r 进行敏感性分析. 参考相关文献^[17, 27, 29], 对参数进行赋值, 令 $c_m = 0.15$, $c_p = d_p = 0.04$, $\delta = 0.3$, $T_k = 0.14$, $T_l = 0.12$, $c_l = d_l = 0.05$, $c_k = d_k = 0.06$.

首先, 本文分析消费者对联盟回收的信任偏好程度和消费者对第三方回收的信任偏好程度分别对生产商和零售商利润的影响, 见图 4~图 5.

从图 4~图 5 可知, 在一定范围内, 随着消费者的回收信任程度提高, 两种模式下的生产商和零售商的利润均是增大的. 此外, 相较于第三方回收模式, 联盟回收模式下消费者的信任偏好程度对供应链整体利润的影响更大 (见表 3), 即选择联盟回收是生产商的最优回收策略. 因此, 生产商可以进一步向消费者宣传联盟

回收的理念和优势,加深消费者对联盟回收的认识,进而扩大企业利润的增幅空间.政府可以通过EPR相关政策引导并鼓励没有自主回收能力的生产商通过联盟回收履行回收责任.在一定条件下,考虑EPR和消费者信任偏好的联盟回收模式确实更优于第三方回收模式,但从企业回收系统的韧性角度讲,多回收渠道共存发展才是生产商不断提升竞争能力,高效履行回收责任,提高环境改善程度的最佳决策.

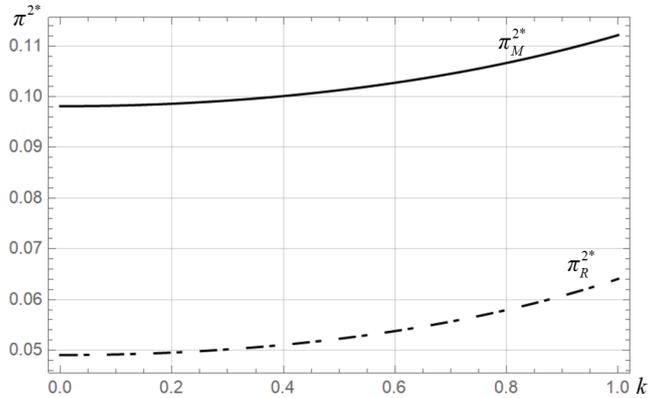


图 4 消费者对联盟回收的信任偏好程度对生产商和零售商利润的影响

Fig. 4 Impact of consumer trust preference degree in alliance recycling on the profits of manufacturer and retailer

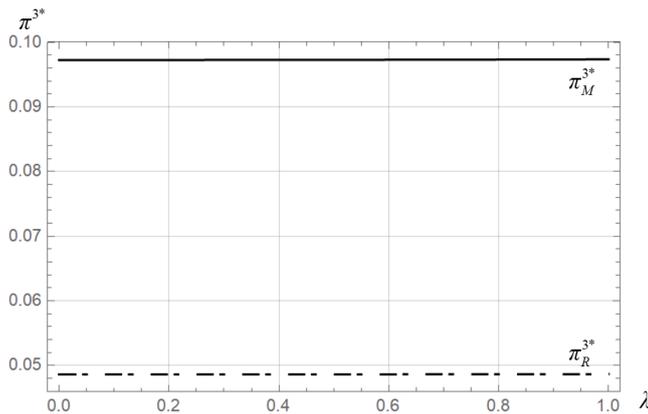


图 5 消费者对第三方回收的信任偏好程度对生产商和零售商利润的影响

Fig. 5 Impact of consumer trust preference degree in third-party recycling on the profits of manufacturer and retailer

表 3 消费者对第三方回收的信任偏好程度对生产商和零售商利润的影响

λ	0.1	0.3	0.5	0.7	0.9
π_M^{3*}	0.097 242	0.097 249	0.097 267	0.097 294	0.097 326
π_R^{3*}	0.048 620	0.048 625	0.048 633	0.048 647	0.048 666

其次,本文分析消费者信任偏好程度和废旧电子产品回收率对生产商利润的影响,见图6~图8.从图6~图8可整体发现,每种情况下的生产商的利润都与回收率呈正相关,即随着电子废弃物回收率的增大,生产商的利润也会逐渐增大.

由图6可知,当 $k \geq \max\left(\sqrt{\frac{8(A-B)}{A}}, \sqrt{\frac{8C-512B}{C}}\right)$ 时(具体证明见推论1),消费者对联盟回收的信任偏好程度相对偏高,联盟回收时生产商的利润最大,第三方回收的利润最小,此时生产商的最优选择是考虑EPR的生产商联盟回收模式.

从图7可知,当 $\lambda \geq \max\left(\sqrt{\frac{8E}{F}}, \sqrt{\frac{16\sqrt{2B}-8D\sqrt{8-k^2}}{rF\sqrt{8-k^2}}}\right)$ 时(具体证明见推论1),消费者对第三方回收的信任偏好程度相对偏高,第三方回收时生产商的利润最大,生产商自主回收的利润最小,此时生产商的最优选择是考虑EPR的第三方回收模式.

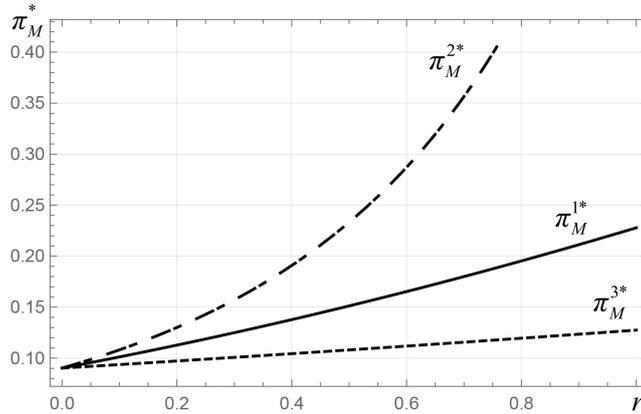


图 6 消费者对联盟回收的信任偏好程度较高时回收率对生产商利润的影响

Fig. 6 Impact of recovery rate on the manufacturer's profit with high consumer trust preference degree in alliance recycling

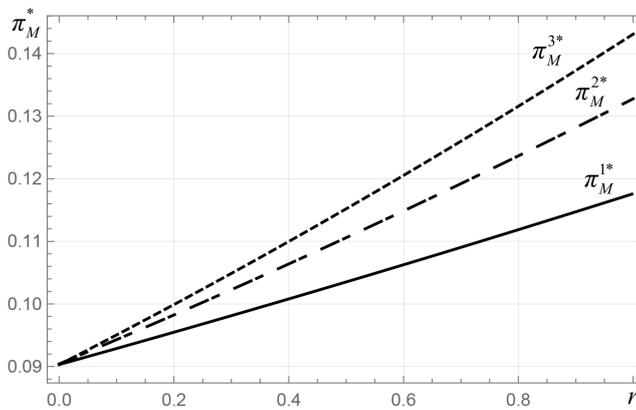


图 7 消费者对第三方回收的信任偏好程度较高时回收率对生产商利润的影响

Fig. 7 Impact of recovery rate on manufacturer's profit with high consumer trust preference degree in third-party recycling

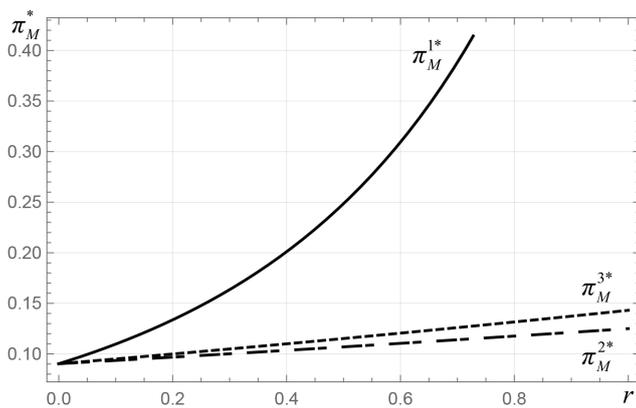


图 8 消费者对有 EPR 回收的信任偏好程度较低时回收率对生产商利润的影响

Fig. 8 Impact of recovery rate on manufacturer's profit with low consumer trust preference degree in both EPR recycling models

由图 8 可知, 当 $k < \sqrt{\frac{8(A-B)}{A}}$ 且 $\lambda < \sqrt{\frac{8E}{F}}$ 时 (具体证明见推论 1), 消费者对联盟回收和第三方回收的信任偏好程度均偏低, 消费者此时不会倾向于这两种回收模式, 所以自主回收时生产商的利润最大, 联盟回收的利润最小, 此时生产商会选择自主回收模式.

最后, 分析消费者信任偏好程度和废旧电子产品回收率对社会福利的影响, 见图 9~图 11.

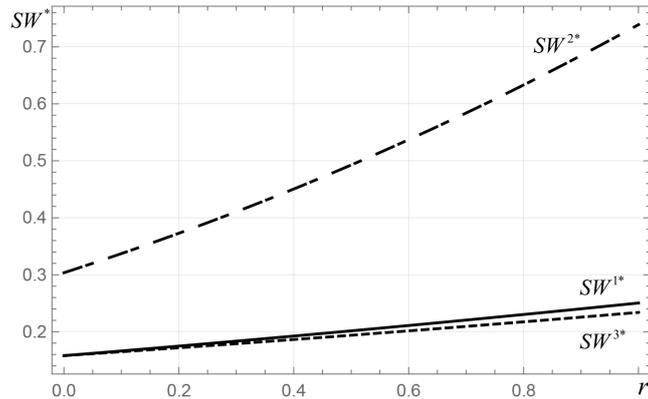


图 9 消费者对联盟回收的信任偏好程度较高时回收率对社会福利的影响

Fig. 9 Impact of recovery rate on social welfare with high consumer trust preference degree in alliance recycling

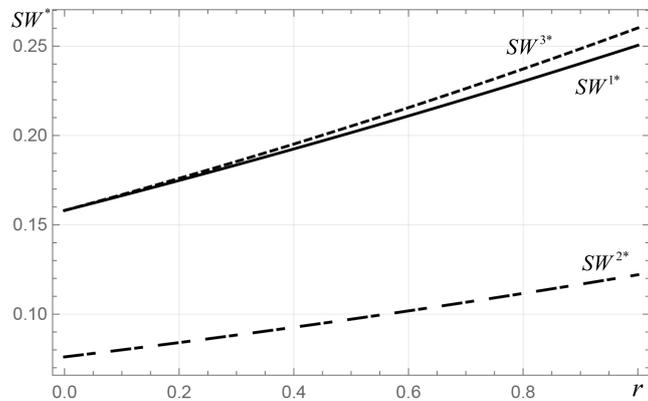


图 10 消费者对第三方回收的信任偏好程度较高时回收率对社会福利的影响

Fig. 10 Impact of recovery rate on social welfare with high consumer trust preference degree in third-party recycling

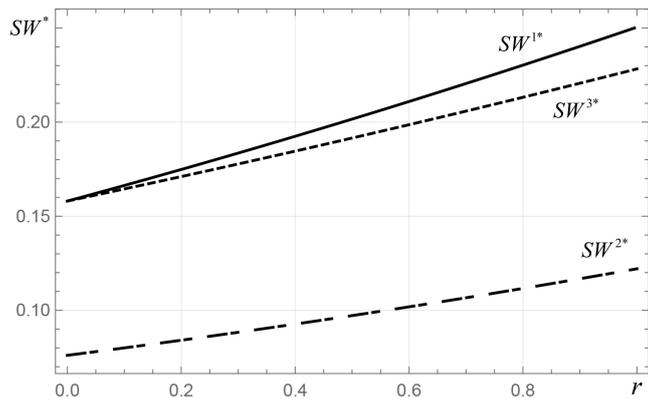


图 11 消费者对有 EPR 回收的信任偏好程度较低时回收率对社会福利的影响

Fig. 11 Impact of recovery rate on social welfare with low consumer trust preference degree in both EPR recycling models

从图 9~图 11 可知,在不同消费者信任偏好边界范围内,随着废旧电子产品回收率的提高,各模式下的社会总福利逐渐增大;当消费者对考虑 EPR 的联盟回收(第三方回收)信任偏好程度较高时,联盟回收(第三方回收)是生产商的最优决策,同时该模式下的社会总福利最大;当消费者对考虑 EPR 的联盟回收(第三方回收)信任偏好程度较低时,无 EPR 的生产商自主回收模式是最优决策,同时该模式下社会总福利最大.即生产商在选择能使自身利润最大化的回收模式的同时,也提升了社会总福利.可见,生产商自身利益与社会总福利在根本上是一致的.因此,生产商应重视 EPR 相关政策和消费者信任偏好对废旧电子产品回收决策的综合影响,通过产品生命周期管理践行回收责任,提升消费者对产品环境属性的认知,实现企业自身利益

和社会总福利最大化. 同时, 结合优化生产商利润和提升社会福利的一致性, 政府可以协同电子产品生产商进行回收模式创新, 共同建设便于消费者回收的基础设施, 以提高消费者回收意愿和废旧电子产品回收率, 优化供应链整体利润同时, 提升社会总福利.

6 拓展分析: 回收率内化情境

在前文分析中, 本文假设废旧电子产品的回收率是外生变量. 而回收率在产品回收定价回收努力程度等企业行为决策的基础上, 对定价和回收策略有重要影响, 发现给定废旧电子产品回收率条件下, **EPR** 下联盟回收模式优于第三方回收. 因此, 本节对废旧电子产品回收率假设进行拓展, 分析考虑 **EPR** 下的两种回收模式的回收率内化的情境, 进一步剖析生产商的最优回收策略, 以突出关键结论的鲁棒性.

具体来说, 在生产商联盟回收和第三方回收两种模式下, 分别由联盟和第三方回收商决策回收率 r_i , r_i 代表回收的废旧电子产品数量占总售出的电子产品的比例, $0 < r_i < 1$, 并产生回收努力成本 r_i^2 (文献[30]有类似假设).

6.1 两种 **EPR** 下回收模式的利润函数和最优解

在考虑 **EPR** 的联盟回收模式中, 首先, 生产商决定批发价格和回收努力水平; 其次, 零售商决策销售价格, 联盟决策回收率. 此时零售商, 生产商联盟和生产商的利润函数分别为零售商的利润函数

$$\pi_R^r = (p_r - \omega_r)(1 - p_r + ke_r), \quad (12)$$

生产商联盟的利润函数

$$\pi_L^r = r_r(T_l - c_l - d_l)(1 - p_r + ke_r) - r_r^2, \quad (13)$$

生产商的利润函数

$$\pi_M^r = (\omega_r - c_m + r_r\delta - r_rT_l)(1 - p_r + ke_r) - e_r^2. \quad (14)$$

在考虑 **EPR** 的第三方回收模式中, 首先, 回收商决策专业技术水平和回收率; 其次, 生产商决定批发价格; 最后, 零售商决策销售价格. 此时零售商, 生产商和回收商的利润函数分别为零售商的利润函数

$$\pi_R^{2r} = (p_{2r} - \omega_{2r})(1 - p_{2r} + \lambda g_{2r}), \quad (15)$$

生产商的利润函数

$$\pi_M^{2r} = (\omega_{2r} - c_m + r_{2r}\delta - r_{2r}T_k)(1 - p_{2r} + \lambda g_{2r}), \quad (16)$$

回收商的利润函数

$$\pi_K^{2r} = r_{2r}(T_k - c_k - d_k)(1 - p_{2r} + \lambda g_{2r}) - g_{2r}^2 - r_{2r}^2. \quad (17)$$

两种拓展 **EPR** 下回收模式的渠道权力结构与前文相同, 同理, 通过 **Stackelberg** 博弈的逆向归纳求解法, 得到两种模式下的最优解和最优利润, 如表 4 所示.

6.2 回收率内化的最优回收策略分析

沿用 5.2 节的参数赋值, 分析当回收率内化时, 消费者对联盟回收的信任程度和消费者对第三方回收的信任程度分别对生产商和零售商利润的影响, 见图 12~图 13.

从图 12~图 13 可知, 当回收率内化时并在一定范围内, 两种模式下的生产商和零售商的利润均与消费者的回收信任偏好程度正相关. 此外, 相较于第三方回收模式, 联盟回收模式下消费者的信任偏好程度对供应链整体利润的影响更大 (见表 5), 这与前文废旧电子产品回收率为外生变量时的结论一致, 即无论是否内

化废旧电子产品回收率, 选择联盟回收总是生产商的最优回收策略.

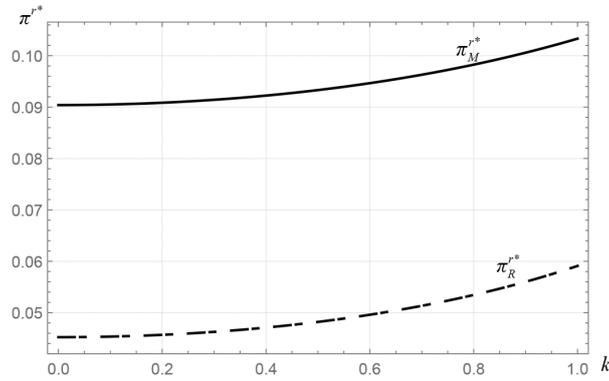


图 12 回收率内化时消费者对联盟回收的信任偏好程度对生产商和零售商利润的影响

Fig. 12 Impact of consumer trust preference degree in alliance recycling on the profits of manufacturer and retailer with internalized recovery rate

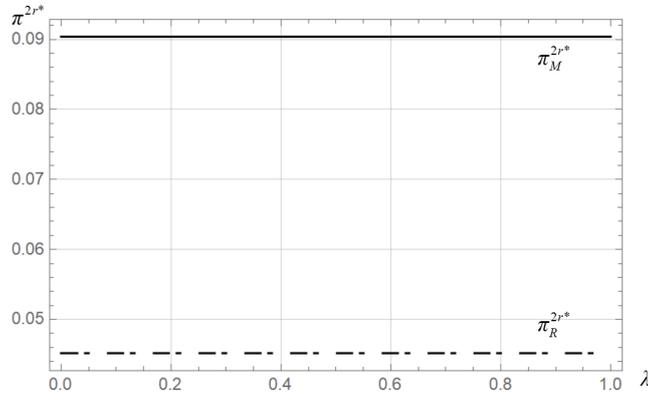


图 13 回收率内化时消费者对第三方回收的信任偏好程度对生产商和零售商利润的影响

Fig. 13 Impact of consumer trust preference degree in third-party recycling on the profits of manufacturer and retailer with internalized recovery rate

表 4 两种拓展模式的最优解和最优利润

Table 4 Optimal solution and optimal profit of two expansion models

模式	最优解	最优利润
回收率内化 的联盟回收	$\omega_r^* = \frac{4 - (-4 + k^2)c_m + 2(\delta - T_l)(c_l + d_l - T_l)}{8 - k^2 + 2(\delta - T_l)(c_l + d_l - T_l)};$ $p_r^* = \frac{6 - (-2 + k^2)c_m + 2(\delta - T_l)(c_l + d_l - T_l)}{8 - k^2 + 2(\delta - T_l)(c_l + d_l - T_l)};$ $e_r^* = \frac{k(1 - c_m)}{8 - k^2 + 2(\delta - T_l)(c_l + d_l - T_l)};$ $r_r^* = \frac{(-1 + c_m)(c_l + d_l - T_l)}{8 - k^2 + 2(\delta - T_l)(c_l + d_l - T_l)};$	$\pi_R^{r*} = \frac{4(-1 + c_m)^2}{(8 - k^2 + 2(\delta - T_l)(c_l + d_l - T_l))^2};$ $\pi_L^{r*} = \frac{(-1 + c_m)^2(c_l + d_l - T_l)^2}{(8 - k^2 + 2(\delta - T_l)(c_l + d_l - T_l))^2};$ $\pi_M^{r*} = \frac{(-1 + c_m)^2}{8 - k^2 + 2(\delta - T_l)(c_l + d_l - T_l)};$
回收率内化 的第三方回收	$\omega_{2r}^* = \frac{32(1 + c_m) - (c_k + d_k - T_k)(12(-\delta + T_k) + c_m(-4\delta + \lambda^2(c_k + d_k - T_k) + 4T_k))}{64 - (c_k + d_k - T_k)(\lambda^2(c_k + d_k - T_k) + 16(-\delta + T_k))};$ $p_{2r}^* = \frac{16(3 + c_m) - (c_k + d_k - T_k)(14(-\delta + T_k) + c_m(-2\delta + \lambda^2(c_k + d_k - T_k) + 2T_k))}{64 - (c_k + d_k - T_k)(\lambda^2(c_k + d_k - T_k) + 16(-\delta + T_k))};$ $g_{2r}^* = \frac{\lambda(1 - c_m)(c_k + d_k - T_k)^2}{64 - (c_k + d_k - T_k)(\lambda^2(c_k + d_k - T_k) + 16(-\delta + T_k))};$ $r_{2r}^* = \frac{8(-1 + c_m)(c_k + d_k - T_k)}{64 - (c_k + d_k - T_k)(\lambda^2(c_k + d_k - T_k) + 16(-\delta + T_k))};$	$\pi_R^{2r*} = \frac{4(-1 + c_m)^2(8 + (\delta - T_k)(c_k + d_k - T_k))^2}{(64 - (c_k + d_k - T_k)(\lambda^2(c_k + d_k - T_k) + 16(-\delta + T_k)))^2};$ $\pi_M^{2r*} = \frac{8(-1 + c_m)^2(8 + (\delta - T_k)(c_k + d_k - T_k))^2}{(64 - (c_k + d_k - T_k)(\lambda^2(c_k + d_k - T_k) + 16(-\delta + T_k)))^2};$ $\pi_K^{2r*} = \frac{(-1 + c_m)^2(c_k + d_k - T_k)^2}{64 - (c_k + d_k - T_k)(\lambda^2(c_k + d_k - T_k) + 16(-\delta + T_k))};$

表 5 回收率内化时消费者对第三方回收的信任偏好程度对生产商和零售商利润的影响

Table 5 Impact of consumer trust preference degree in alliance recycling on the profits of manufacturer and retailer with internalized recovery rate

λ	0.1	0.3	0.5	0.7	0.9
π_M^{2r*}	0.090 505	0.090 524	0.0905 42	0.090 566	0.090 587
π_R^{2r*}	0.045 310	0.045 318	0.045 329	0.045 341	0.045 353

7 结束语

本文考虑 EPR 和消费者信任偏好对闭环供应链回收决策的影响问题, 构建了无 EPR 的生产商自主回收模式, 考虑 EPR 的联盟回收模式和考虑 EPR 的第三方回收模式, 分析三种不同模式中供应链企业的最优回收决策. 主要结论和管理启示如下: (1) 考虑 EPR 的联盟回收模式中, 随着消费信任偏好程度增大, 批发价格和销售价格均减小, 而供应链企业利润和社会福利均增大; 在考虑 EPR 的第三方回收模式下, 随着消费者信任偏好程度增大, 批发价、销售价、供应链企业利润和社会福利均增大. (2) 考虑 EPR 的联盟回收和第三方回收模式中, 无论是否内化废旧电子产品的回收率, 较于第三方回收模式, 联盟回收模式下消费者信任偏好程度对供应链整体利润的正向影响更大, 即随着消费者信任偏好程度增大, 选择联盟回收是生产商的最优回收策略. (3) 消费者信任偏好在一定边界范围内, 生产商最优回收策略的社会福利最大. (4) 政府可以通过 EPR 政策引导并激励受回收能力约束的生产商选择联盟回收模式, 并与生产企业协同构建闭环供应链回收生态系统, 提升回收基础设施便利性和服务水平, 进而提高消费者的回收意愿. 此外生产商要重视 EPR 和消费者信任偏好对回收决策的重要影响, 创新回收模式, 保障消费者数据安全, 提高消费者对企业回收的信心, 进而形成良性的生态循环系统, 提高废旧电子产品回收率和企业利润, 实现社会福利的最大化. 本文在回收市场上只对一个生产商、零售商、回收联盟和第三方回收商进行研究, 可进一步扩展为多个生产商、零售商、回收联盟以及第三方回收商在竞合环境下的决策情形; 再则, 本文的研究未考虑政府监管和补贴对供应链利润的影响, 未来可考虑政府参与决策的情况.

参考文献:

- [1] 李勇建, 冯立攀, 赵秀堃, 等. 新运营时代的逆向物流研究进展与展望. 系统工程理论与实践, 2020, 40(8): 2008–2022.
Li Y J, Feng L P, Zhao X K, et al. Overview on reverse logistics management research in new era of operations management. Systems Engineering: Theory & Practice, 2020, 40(8): 2008–2022. (in Chinese)
- [2] Beul D, Sureshkuma M. A review on the toxic e-waste killing health and environment—Today's global scenario. Production and Operations Management, 2021, 47(9): 2168–2574.
- [3] Esenduran G, Lin Y T, Xiao W, et al. Choice of electronic waste recycling standard under recovery channel competition. Manufacturing & Service Operations Management, 2020, 22(3): 429–643.
- [4] Organisation for Economic Co-operation and Development. Extended Producer Responsibility: Updated Guidance for Efficient Waste Management. Paris: OECD, 2016: 1–292.
- [5] 国务院办公厅. 国务院办公厅关于印发生产者责任延伸制度推行方案的通知. http://www.gov.cn/zhengce/content/2017-01/03/content_5156043.htm, 2017-01-03[2022-10-04].
General Office of the State Council. Circular of the General Office of the State Council on printing and distributing the implementation plan of the extended producer responsibility. http://www.gov.cn/zhengce/content/2017-01/03/content_5156043.htm, 2017-01-03[2022-10-04].
- [6] 国务院办公厅. 国务院办公厅关于深化电子电器行业管理制度改革的意见. http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-09/23/content_5711385.htm, 2022-09-23[2022-10-04].
General Office of the State Council. Opinions of the General Office of the State Council on deepening the reform of the administration system of the electronic and electrical industry. http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-09/23/content_5711385.htm, 2022-09-23[2022-10-04].

- [7] World Wide Fund for Nature. How to Implement Extended Producer Responsibility: [A Briefing](#) for Governments and Businesses. Gland: WWF, 2020: 1–34.
- [8] Wang Z H, Guo D X, Wang X M, et al. How does information publicity influence residents' behavior intentions around e-waste recycling? *Resources Conservation & Recycling*, 2018, 133(6): 1–9.
- [9] Liu B, Zhu W, Shen Y, et al. A study about return policies in the presence of consumer social learning. *Production and Operations Management*, 2022, 31(6): 2571–2587.
- [10] Cao K, Choi T. Optimal trade-in return policies: Is it wise to be generous? *Production and Operations Management*, 2022, 31(3): 1309–1331.
- [11] Circularonline.co.uk. Make manufacturers pay for recycling, UK says in viridor-yougov poll. <https://www.circularonline.co.uk/news/make-manufacturers-pay-for-recycling-uk-says-in-viridor-yougov-poll/>, 2020–09–22[2022–10–04].
- [12] 汪旭晖, 王东明. 平台卖家生成内容对于消费者信任的影响研究——平台企业生成内容的交互效应. *南开管理评论*, 2021, 1(1): 1–19.
Wang X H, Wang D M. The impact of seller-generated content on consumers' trust: [An interactive](#) effect of E-commerce platform-generated content. *Nankai Business Review*, 2021, 1(1): 1–19. (in Chinese)
- [13] Kurdhi N, Dabadghao S, Fransoo J. Revenue management in a refurbishing duopoly with cannibalization. *Journal of Operations Management*, 2022, 1(1): 1–15.
- [14] 梁喜, 张余婷. 基于消费者偏好的低碳双渠道供应链定价与减排策略. *运筹与管理*, 2020, 29(12): 107–117.
Liang X, Zhang Y T. Dual-channel supply chain pricing decision and emission reduction policies based on consumer preference to low carbon. *Operations Research and Management Science*, 2020, 29(12): 107–117. (in Chinese)
- [15] 刘侃莹, 李巍. 基于消费者偏好差异的绿色产品行为定价策略比较. *中国管理科学*, 2022, 1(1): 1–12.
Liu K Y, Li W. Comparison of green product behavior pricing strategies based on consumer preference differences. *Chinese Journal of Management Science*, 2022, 1(1): 1–12. (in Chinese)
- [16] Ping H A, Zheng W A, Vs B, et al. The direct and cross effects in a supply chain with consumers sensitive to both carbon emissions and delivery time. *European Journal of Operational Research*, 2020, 292(1): 172–183.
- [17] 卢荣花, 李南. 电子产品闭环供应链回收渠道选择研究. *系统工程理论与实践*, 2016, 36(7): 1687–1695.
Lu R H, Li N. Take-back channel selection of closed-loop supply chain for an electronic product. *Systems Engineering: Theory & Practice*, 2016, 36(7): 1687–1695. (in Chinese)
- [18] 苏玲, 杨磊, 邱俊源, 等. C2C二手市场存在下闭环供应链的定价策略和回收模式选择. *管理学报*, 2022, 19(4): 584–594.
Su L, Yang L, Qiu J Y, et al. Pricing strategy and recovery mode selection of closed-loop supply chain in C2C second-hand market. *Chinese Journal of Management*, 2022, 19(4): 584–594. (in Chinese)
- [19] 贾俊秀, 赵学科. 政府补贴下新能源汽车供应链电池续航能力及回收策略. *系统工程学报*, 2022, 37(3): 330–343.
Jia J X, Zhao X K. Battery endurance and recovery strategy of new energy vehicle supply chain under government subsidy. *Journal of Systems Engineering*, 2022, 37(3): 330–343. (in Chinese)
- [20] 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. *系统工程学报*, 2021, 36(6): 833–850.
Xiao D, Nie S S. Competition and cooperation strategy of closed-loop supply chain members under the competition of recyclers. *Journal of Systems Engineering*, 2021, 36(6): 833–850. (in Chinese)
- [21] 康凯, 赵宇杰, 张敬. 双渠道供应链企业回收策略演化与协调. *系统工程学报*, 2021, 36(6): 777–797.
Kang K, Zhao Y J, Zhang J. Evolution and coordination of recovery strategies in dual channel supply chain enterprises. *Journal of Systems Engineering*, 2021, 36(6): 777–797. (in Chinese)
- [22] 赵强, 夏西强. 回收宣传模式对废旧产品回收影响及协调机制研究. *中国管理科学*, 2022, 30(3): 258–268.
Zhao Q, Xia X Q. Studying on the influence of recycling promotion models on the waste products recycling and coordination mechanism. *Chinese Journal of Management Science*, 2022, 30(3): 258–268. (in Chinese)
- [23] He Q, Wang N, Browning T, et al. Competitive collection with convenience perceived customers. *European Journal of Operational Research*, 2022, 303(1): 239–254.
- [24] Isil A, Vishal V, Atalay A, et al. Extended Producer Responsibility for durable products. *Manufacturing and Service Operations Management*, 2020, 22(2): 364–382.
- [25] Feng L, Govindan K, Li C. Strategic planning: [Design](#) and coordination for dual-recycling channel reverse supply chain considering consumer behavior. *European Journal of Operational Research*, 2017, 260(2): 601–612.

- [26] 曹 裕, 李青松, 胡韩莉. 不同政府补贴策略对供应链绿色决策的影响研究. 管理学报, 2019, 16(2): 297-305+316.
Cao Y, Li Q S, Hu H L. Research on the influence of different government subsidy strategies on the green decision-making of supply chain. Chinese Journal of Management, 2019, 16(2): 297-305+316. (in Chinese)
- [27] 简惠云, 黄秋兰, 许民利. 闭环供应链中互联网回收平台合作推广研究. 中国管理科学, 2020, 1(1): 1-10.
Jian H Y, Huang Q L, Xu M L. Research on cooperative promotion of internet recycling platform in closed loop supply chain. Chinese Journal of Management Science, 2020, 1(1): 1-10. (in Chinese)
- [28] 姚锋敏, 闫颖洛, 滕春贤. 考虑政府补贴及CSR投入的闭环供应链运作协调. 系统工程学报, 2021, 36(6): 817-832.
Yao F M, Yan Y L, Teng C X. Operation coordination of closed-loop supply chain considering government subsidies and CSR input. Journal of Systems Engineering, 2021, 36(6): 817-832. (in Chinese)
- [29] 张子健, 郭明波, 陈全朋. EPR下动力电池梯度利用的闭环供应链定价策略与协调机制. 工业工程, 2020, 23(3): 10-18.
Zhang Z J, Guo M B, Chen Q P. Closed-loop supply chain pricing strategy and coordination mechanism for gradient utilization of power battery under EPR. Industrial Engineering Journal, 2020, 23(3): 10-18. (in Chinese)
- [30] 冯章伟, 肖条军, 柴彩春. 第三方回收商领导型两级闭环供应链的回收与定价策略. 中国管理科学, 2018, 26(1): 118-127.
Feng Z W, Xiao T J, Chai C C. Recycling and pricing strategy of a two level closed loop supply chain led by a third party recycler. Chinese Journal of Management Science, 2018, 26(1): 118-127. (in Chinese)

作者简介:

赵秀堃 (1986—), 女, 天津人, 博士, 副教授, 研究方向: 可持续供应链管理, Email: zhaoxiukun@tjufe.edu.cn;

李冬冬 (1997—), 男, 天津人, 硕士生, 研究方向: 可持续供应链管理, Email: 549887854@qq.com;

杨芳芳 (1999—), 女, 河南漯河人, 硕士生, 研究方向: 可持续供应链管理, Email: yangstarry@126.com;

徐芳超 (1991—), 女, 天津人, 博士, 讲师, 研究方向: 可持续供应链管理, Email: xufc@mail.nankai.edu.cn.

附录

命题 1 证明 采用逆向归纳法求解, 依据式 (1), 令 $\frac{\partial \pi_R^1}{\partial p_1} = 0$, 可确定零售商的反应函数 $p_1 = \frac{1+\omega_1}{2}$. 将 p_1 代入式 (2), 此时的生产商的利润函数 π_M^1 成为 ω_1 的单变量函数, 即 $\pi_M^1 = (\omega_1 - c_m + r\delta - rc_p - rd_p) \left(\frac{1-\omega_1}{2}\right)$. 进而可确定 π_M^1 对批发价格 ω_1 的二阶导数 $\frac{\partial^2 \pi_M^1}{\partial \omega_1^2} = -1 < 0$, π_M^1 是 ω_1 的严格凹函数. 进一步地, 令 $\frac{\partial \pi_M^1}{\partial \omega_1} = 0$, 可得到最优批发价格 ω_1^* , 将 ω_1^* 代入 p_1 可得最优零售价格, 将 $\omega_1^* p_1^*$ 代入到式 (1)、式 (2) 与式 (3) 中, 可得零售商生产商最优利润和最优社会福利.

证毕.

命题 2 证明 采用逆向归纳法求解, 依据式 (4), 令 $\frac{\partial \pi_R^2}{\partial p_2} = 0$, 可确定零售商的反应函数 $p_2 = \frac{1+\omega_2+ke}{2}$. 将 p_2 代入式 (5), 此时的生产商的利润函数 π_M^2 成为 ω_2 与 e 的双变量函数, 即 $\pi_M^2 = (\omega_2 - c_m + r\delta - rT_l) \left(1 - \frac{1+\omega_2+ke}{2} + ke\right) - e^2$.

进而可建立 π_M^2 对批发价格 ω_2 和努力水平 e 的海瑟矩阵 $H = \begin{bmatrix} -1 & \frac{k}{2} \\ \frac{k}{2} & -2 \end{bmatrix}$, 一阶顺序主子式 $|H_1| = -1 < 0$, 二阶顺序主子式 $|H_2| = 2 - \frac{k^2}{4} > 0$, 解出 $0 < k < 2\sqrt{2}$, 此时海瑟矩阵负定, π_M^2 是 ω_2 与 e 的严格凹函数, 所求的解为最优解. 进一步地, 联立 $\frac{\partial \pi_M^2}{\partial \omega_2} = 0$ 及 $\frac{\partial \pi_M^2}{\partial e} = 0$ 两个方程, 可得到最优批发价格 ω_2^* 和 e^* , 将 ω_2^* 与 e^* 代入 p_2 可得最优零售价格, 将 $\omega_2^* p_2^*$ 及 e^* 代入到式 (4) 至式 (7) 中, 可得零售商生产商与回收联盟的最优利润和最优社会福利.

证毕.

命题 3 证明 采用逆向归纳法求解, 依据式 (8), 令 $\frac{\partial \pi_R^3}{\partial p_3} = 0$, 可确定零售商的反应函数 $p_3 = \frac{1+\omega_3+\lambda g}{2}$. 将 p_3 代入式 (9), 此时的生产商的利润函数 π_M^3 成为 ω_3 的单变量函数, 即 $\pi_M^3 = (\omega_3 - c_m + r\delta - rT_k) \left(1 - \frac{1+\omega_3+\lambda g}{2} + \lambda g\right)$, 进而可确定 π_M^3 对批发价格 ω_3 的二阶导数 $\frac{\partial^2 \pi_M^3}{\partial \omega_3^2} = -1 < 0$, π_M^3 是 ω_3 的严格凹函数, 进一步地令 $\frac{\partial \pi_M^3}{\partial \omega_3} = 0$, 得 $\omega_3 = \frac{1+\lambda g+c_m-r\delta+rT_k}{2}$, 将 ω_3 代入 p_3 中, 可得 $p_3 = \frac{3+3\lambda g+c_m-r\delta+rT_k}{4}$, 把得到的结果代入式 (10), 此时第三方的利润函数 π_K 成为 g 的单变量函数, 即 $\pi_K^3 = r(T_k - c_k - d_k) \left(1 - \frac{3+3\lambda g+c_m-r\delta+rT_k}{4} + \lambda g\right) - g^2$. 进而可确定 π_K^3 对技术水平 g 的二阶导数 $\frac{\partial^2 \pi_K^3}{\partial g^2} = -2 < 0$, π_K^3 是 g 的严格凹函数. 进一步令 $\frac{\partial \pi_K^3}{\partial g} = 0$, 可得到最优技术水平 g^* , 将 g^* 代入 $\omega_3 p_3$ 可得最优批发价格最优零售价格, 将 $g^* \omega_3^* p_3^*$ 代入到式 (8) 至式 (11) 中, 可得零售商生产商与第三方企业最优利润和最优社会福利.

证毕.

推论 1 证明 当联盟回收模式对生产商最优时, 联立不等式 $\begin{cases} \pi_M^{2*} \geq \pi_M^{1*} \\ \pi_M^{2*} \geq \pi_M^{3*} \end{cases}$, 解得 $k \geq \max\left(\sqrt{\frac{8(A-B)}{A}}, \sqrt{\frac{8C-512B}{C}}\right)$,

其他模式同理.

证毕.

推论 2 证明 对三种模式下的最优批发价格进行两两比较可以得到 $\omega_1^* - \omega_3^* = -\frac{\lambda^2 r(T_k - c_k - d_k) + 8r(T_k - c_p - d_p)}{16} < 0$, 所以 $\omega_1^* < \omega_3^*$.

$$\omega_2^* - \omega_3^* = \frac{64r(T_l - T_k) + 8k^2(1 - c_m + r\delta + rT_k - 2rT_l) - \lambda^2 r(8 - k^2)r(T_k - c_k - d_k)}{16(8 - k^2)},$$

差值的正负分 a)b) 两种情况讨论:

- a) 当 $64r(T_l - T_k) + 8k^2(1 - c_m + r\delta + rT_k - 2rT_l) - \lambda^2 r(8 - k^2)r(T_k - c_k - d_k) > 0$ 时, 解得 $k^2 > \frac{\lambda^2(8 - k^2)r(T_k - c_k - d_k) + 64r(T_k - T_l)}{8(1 - c_m + r\delta + rT_k - 2rT_l)}$, $\omega_2^* > \omega_3^*$, 所以 $\omega_1^* < \omega_3^* < \omega_2^*$;
- b) 当 $64r(T_l - T_k) + 8k^2(1 - c_m + r\delta + rT_k - 2rT_l) - \lambda^2 r(8 - k^2)r(T_k - c_k - d_k) \leq 0$ 时, 解得 $k^2 \leq \frac{\lambda^2(8 - k^2)r(T_k - c_k - d_k) + 64r(T_k - T_l)}{8(1 - c_m + r\delta + rT_k - 2rT_l)}$, $\omega_2^* \leq \omega_3^*$.

$$\omega_1^* - \omega_2^* = \frac{8r(T_l - c_p - d_p) - k^2(2rT_l - r\delta + c_m - rc_p - rd_p - 1)}{2(8 - k^2)},$$

差值的正负分 b.1)b.2) 两种情况讨论:

- b.1) 当 $8r(T_l - c_p - d_p) - k^2(2rT_l - r\delta + c_m - rc_p - rd_p - 1) \leq 0$ 时, 解得 $k^2 \geq \frac{8r(T_l - c_p - d_p)}{2rT_l - r\delta + c_m - rc_p - rd_p - 1}$, $\omega_1^* \leq \omega_2^*$, 所以当 $\frac{8r(T_l - c_p - d_p)}{2rT_l - r\delta + c_m - rc_p - rd_p - 1} \leq k^2 \leq \frac{\lambda^2(8 - k^2)r(T_k - c_k - d_k) + 64r(T_k - T_l)}{8(1 - c_m + r\delta + rT_k - 2rT_l)}$ 时, $\omega_1^* \leq \omega_2^* \leq \omega_3^*$;
- b.2) 当 $8r(T_l - c_p - d_p) - k^2(2rT_l - r\delta + c_m - rc_p - rd_p - 1) > 0$ 时, 解得 $k^2 < \frac{8r(T_l - c_p - d_p)}{2rT_l - r\delta + c_m - rc_p - rd_p - 1}$, $\omega_1^* > \omega_2^*$, 所以当 $k^2 < \frac{8r(T_l - c_p - d_p)}{2rT_l - r\delta + c_m - rc_p - rd_p - 1}$ 时, $\omega_2^* < \omega_1^* < \omega_3^*$.

证毕.

推论 3 证明 对三种模式下的最优销售价格进行两两比较可以得到:

$$p_1^* - p_3^* = -\frac{3\lambda^2 r(T_k - c_k - d_k) + 8r(T_k - c_p - d_p)}{32} < 0,$$

所以 $p_1^* < p_3^*$.

$$p_2^* - p_3^* = \frac{64r(T_l - T_k) + 8k^2(3 - 3c_m + 3r\delta + rT_k - 4rT_l) + 3\lambda^2 r(k^2 - 8)r(T_k - c_k - d_k)}{32(8 - k^2)},$$

差值的正负分 a)b) 两种情况讨论:

- a) 当 $64r(T_l - T_k) + 8k^2(3 - 3c_m + 3r\delta + rT_k - 4rT_l) + 3\lambda^2 r(k^2 - 8)r(T_k - c_k - d_k) > 0$ 时, 解得 $k^2 > \frac{3\lambda^2(8 - k^2)r(T_k - c_k - d_k) + 64r(T_k - T_l)}{8(rT_k + 3 - 4rT_l + 3r\delta - 3c_m)}$, $p_2^* > p_3^*$, 所以 $p_1^* < p_3^* < p_2^*$;
- b) 当 $64r(T_l - T_k) + 8k^2(3 - 3c_m + 3r\delta + rT_k - 4rT_l) + 3\lambda^2 r(k^2 - 8)r(T_k - c_k - d_k) \leq 0$ 时, 解得 $k^2 \leq \frac{3\lambda^2(8 - k^2)r(T_k - c_k - d_k) + 64r(T_k - T_l)}{8(rT_k + 3 - 4rT_l + 3r\delta - 3c_m)}$, $p_2^* \leq p_3^*$.

$$p_2^* - p_1^* = \frac{8r(c_p + d_p - T_l) + k^2(4rT_l - 3r\delta + 3c_m - rc_p - rd_p - 3)}{4(8 - k^2)},$$

差值的正负分 b.1)b.2) 两种情况讨论:

- b.1) 当 $8r(c_p + d_p - T_l) + k^2(4rT_l - 3r\delta + 3c_m - rc_p - rd_p - 3) \geq 0$ 时, 解得 $k^2 \geq \frac{8r(T_l - c_p - d_p)}{4rT_l - 3r\delta + 3c_m - rc_p - rd_p - 3}$, $p_1^* \leq p_2^*$, 所以当 $\frac{8r(T_l - c_p - d_p)}{4rT_l - 3r\delta + 3c_m - rc_p - rd_p - 3} \leq k^2 \leq \frac{3\lambda^2(8 - k^2)r(T_k - c_k - d_k) + 64r(T_k - T_l)}{8(rT_k + 3 - 4rT_l + 3r\delta - 3c_m)}$ 时, $p_1^* \leq p_2^* \leq p_3^*$;
- b.2) 当 $8r(c_p + d_p - T_l) + k^2(4rT_l - 3r\delta + 3c_m - rc_p - rd_p - 3) < 0$ 时, 解得 $k^2 < \frac{8r(T_l - c_p - d_p)}{4rT_l - 3r\delta + 3c_m - rc_p - rd_p - 3}$, $p_1^* > p_2^*$, 所以当 $k^2 < \frac{8r(T_l - c_p - d_p)}{4rT_l - 3r\delta + 3c_m - rc_p - rd_p - 3}$ 时, $p_2^* < p_1^* < p_3^*$.

证毕.