目标责任制和押金返还双重回收规制下闭环供应链决策研究

王竟竟[1†]，马淑姣[2]，杨 鹏[1]

(1. 湖南财政经济学院 工商管理学院，长沙 410205；
2. 湖南财政经济学院 财政金融学院，长沙 410205)

摘 要: 在政府实施回收目标责任制的背景下, 探讨回收目标责任制与消费者押金返还组合政策的有效性. 基于制造商和回收处理商组成的闭环供应链, 构建无回收规制、双重回收规制、双重回收规制且未赎回押金补贴 3 个博弈模型, 通过比较各模型的价格均衡解, 分析组合政策对电子废弃物回收和环境绩效的影响. 获得如下 3 个研究结论: 单独实施回收目标责任制时, 只有较高的回收目标率才能促使制造商和回收处理商对电子废弃物采取全部回收策略; 结合消费者押金返还制度后, 无论目标回收率取何值, 只要匹配适当的押金水平均可实现电子废弃物的全部回收. 回收目标责任制与消费者押金返还的政策组合能够有效改善环境, 但是会消减制造商和供应链利润. 政府可合理设定目标回收率, 并将未赎回押金用于补贴制造商和回收处理商, 从而提升供应链整体利润和回收处理商利润的同时减少对环境的负面影响.

关键词: 回收目标责任制；消费者押金返还；闭环供应链；回收竞争；定价；政策组合

中图分类号: F252 **文献标志码:** A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2025.1001

引用格式: 王竟竟, 马淑姣, 杨鹏. 目标责任制和押金返还双重回收规制下闭环供应链决策研究 [J]. 控制与决策.

Research on closed-loop supply chain decisions under dual recycling regulations: Target responsibility mechanism and deposit-refund scheme

WANG Jing-jing[1†]，*MA Shu-jiao*[2]，*YANG Peng*[1]

(1. School of Business Administration，Hunan College of Finance and Economics，Changsha 410205，China；
2. School of Finance，Hunan College of Finance and Economics，Changsha 410205，China)

Abstract: Against the background of the government's implementation of the recycling target responsibility system, this study investigates the effectiveness of a policy mix combining the recycling target responsibility system and a consumer deposit-refund system. Considering a closed-loop supply chain consisting of a manufacturer and a recycler, three game models are developed: A model without recycling regulation, a model with dual recycling regulations, and a model with dual recycling regulations and subsidies financed by unredeemed deposits. By comparing the equilibrium pricing decisions under the three models, this study examines the effects of the combined policies on waste electrical and electronic equipment recycling and environmental performance. The main findings are as follows. 1) When the recycling target responsibility system is implemented alone, only a sufficiently high recycling target can induce the manufacturer and the recycler to adopt a full-recycling strategy. When the consumer deposit-refund system is introduced, full recycling of waste electrical and electronic equipment can be achieved at any recycling target, provided that an appropriate deposit level is set. 2) The policy mix of the recycling target responsibility system and the consumer deposit-refund system can effectively improve environmental performance, but it reduces the profits of both the manufacturer and the overall supply chain. 3) By appropriately setting the recycling target and using unredeemed deposits to subsidize the manufacturer and the recycler, the government can increase the profits of the overall supply chain and the recycler while reducing adverse environmental impacts.

Keywords: recycling target responsibility mechanism；consumer deposit-refund；closed-loop supply chain；recycling competition；pricing；policy combination

收稿日期: 2025-09-22；**录用日期:** 2026-08-14.
基金项目: 国家自然科学基金项目 (72203057).
责任编委: 李勇建.
†通信作者. E-mail: wjj_xqc@163.com.

0 引 言

随着科技进步和经济快速发展, 家用电器和消费电子产品的更新迭代速度不断加快, 电器电子废弃物数量急剧增加. 废弃电器电子产品中含有铝、镉、铬、锂、钴等重金属, 若处理不当, 将会对环境和人体健康造成严重危害. 在全球应对气候变化的共识背景下, 合理回收和处置废弃电器电子产品成为重点关注的问题. 然而, 在废弃电器电子产品的回收过程中, 企业将回收材料出售给原材料供应商的收入不足以支付设施初始投资和劳动密集型回收过程的成本[1]. 因此, 企业通常不愿意整合回收业务, 导致废弃电器电子产品回收利用率非常低. 此时, 政府法规和激励对废弃电器电子产品回收变得至关重要[2,3]. 2012 年 5 月 21 日, 财政部等六部门联合宣布对电器电子产品生产者征收回收处理基金, 并用于补贴回收拆解企业. 然而, 该制度的缺陷逐渐显现, 维持所收取的处置费与发放的补贴之间的平衡变得越来越困难[4]. 在此背景下, 废弃电器电子产品处理基金自 2024 年 1 月 1 日起停征. 同时, 政府正探索实施新的回收规制政策. 2021 年 7 月 7 日, 国家发展和改革委员会等三部门发布《关于鼓励家电生产企业开展回收目标责任制行动的通知》(发改产业〔2021〕1102 号), 鼓励家电生产企业开展回收目标责任制行动. 此前, 2019 年 1 月 24 日, 生态环境部办公厅和交通运输部办公厅联合印发《铅蓄电池生产企业集中收集和跨区域转运制度试点工作方案》(环办固体〔2019〕5 号), 规定试点单位在试点地区的废铅蓄电池规范回收率达到 40% 以上. 回收目标责任制是生产者责任延伸制度的具体实施方式, 标志着政府对废弃电器电子产品回收的规制由激励性转向强制性, 参与企业须定时定量完成回收目标[5].

在政府的回收规制策略中, 回收目标责任制是面向生产企业的供给侧强制回收政策, 同时也有面向消费者的需求侧激励政策, 如消费者押金返还制度. 消费者押金返还制度要求消费者购买新产品时预先支付一定押金, 当其将废弃商品或其可重复使用的部件退还时可获得押金返还. 德国、瑞典等国家最早将消费者押金返还制度用于饮料容器的回收, 并显著提高了相关容器的回收率. 目前, 这一制度已经在全球得到广泛应用, 欧洲环保机构 Reloop 在《2022 年全球押金手册》(Global Deposit Book 2022) 中研究了押金制对废品回收的影响, 预计到 2026 年底, 全球将有约 7.48 亿人生活在实行押金制的国家或地区, 并强调没有其他回收方法能像押金返还制度那样可靠地回收约 90% 的饮料容器. 国外已将消费者押金返还制度拓展应用至铅酸电池、废弃汽车、废弃轮胎、光伏组件等多个领域. 例如, 德国《电池法》明确要求, 若消费者在购买汽车启动铅酸电池时未交回旧电池, 经销商需向其收取 7.50 欧元押金, 消费者返还旧电池后, 经销商须无条件退还押金.

在我国, 消费者押金返还制度目前主要应用于农药包装废弃物和可重复餐盒回收领域. 我国虽然还暂未将消费者押金返还政策作为电器电子废弃物回收时强制实施的措施, 但已有诸多的理论研究表明消费者押金返还政策适用于我国电器电子废弃物的回收, 例如 Li 等[6] 从演化博弈的视角证明了在中国的动力电池市场实施消费者押金返还制度, 能够显著推动动力电池的正规回收. Yu 等[7] 介绍了我国电子废弃物回收管理政策和试点项目运营状况, 认为押金返还政策是可选政策之一. 同时, 我国也正积极探索在电器电子废弃物领域实施押金返还制度. 例如, 海南省于 2020 年试点实施生产责任制—押金返还制度, 并鼓励企业探索利用押金等方式促进废旧动力蓄电池回收. 2024 年全国两会上, 全国工商联提交了《关于改革废弃电器电子产品处理基金的提案》, 建议改革废弃电器电子产品处理基金制度, 并提议探索针对大宗电子产品的消费者押金返还政策.

已有研究和实践已说明押金返还制度具有一定可行性和必要性. 然而, 若将押金返还制度引入电器电子废弃物回收实践, 仍存在若干运营层面的问题需要分析: 押金水平如何设定, 是否会影响新产品定价和市场需求; 在已有回收目标责任制约束下, 押金返还制能否进一步激励制造商和回收处理商提高回收积极性; 押金返还制在改善回收绩效的同时, 是否会压缩企业和供应链利润; 未赎回押金如何使用, 能否缓解正规回收主体的成本压力等. 基于此, 本文在我国回收目标责任制已实施、原有基金补贴机制调整的背景下, 对消费者押金返还制度作为潜在配套政策工具的运营后果和参数设计进行事前评估, 从而为政府优化电子废弃物回收规制组合、企业制定回收与定价策略提供决策依据.

从理论上看, 关于回收目标责任制, 学者们的研究主要集中在以下几个方面, 一是, 分析回收目标责任制对减少电子废弃物污染和促进资源再利用的政策效果, 如 Wang 等[8] 考虑回收目标和再利用目标, 结合碳税制度, 检验了四种立法政策的有效性. Chen 等[9] 基于双层多目标模型, 评估立法的环境和经济性能. Mazahir 等[10] 研究在回收目标责任制中引入单独的产品再利用目标的影响. 二是, 分析回收目标

责任制对利益相关者的经济影响, 如 Esenduran 等[11] 考虑没有回收立法、有回收目标的立法以及有回收和再利用目标的立法三种立法方式, 分析了不同立法对制造、再制造和回收决策的影响. Xu 等[12] 在具有随机产出的再制造背景下, 研究有无回收目标约束对原始设备制造商决策及绩效的影响. 三是, 回收目标责任制下设计有效的回收体系. 如 Hammond 和 Beullens[13] 探讨了回收目标责任制下如何实现闭环供应链网络均衡. 王竟竟和许民利[14] 对回收目标责任制下实施以旧换新的闭环供应链的回收渠道进行了设计. 四是, 分析回收目标责任制与其他环境法规组合政策的效果. 如 Chen 等[15] 研究了碳排放法规和回收目标责任制双重政策的相互作用机制及政策效果. Liu 等[4] 研究了回收目标责任制和回收处理基金双重规制政策对闭环供应链决策及绩效的影响.

押金退还制度本质上是对购买某种产品征税, 以及对同一产品在使用后的单独回收提供补贴的结合[16], 该制度被认为是促进废弃物回收和再利用的有效政策工具, 如 Palmer 等[17] 对固体废物处理的一项研究发现, 押金返还制度是所有其他价格政策中成本最低的. Linderhof 等[16] 指出, 在当前回收率相对较低的情况下, 押金返还制度在额外回收方面的性能更强. Wojanowski 等[18] 指出押金-退款类型的政策可以更有效地实现回收的约束性社会最优. Kulshreshtha 和 Sarangi[19] 指出押金-退款政策仅在产品被丢弃时对消费者施加成本, 从而影响源头减少废物和通过回收减少废物. 相比之下, 其他政策如预付处置费或回收补贴仅影响源头或回收. 在电子废弃物回收领域, 已有研究主要探讨了消费者押金返还制度引入电子废弃物回收领域的可行性[6,7] 和政府针对供应链成员实施押金返还政策时企业的运营决策, 如王文宾等[20] 探讨了政府对不同供应链成员实施押金返还时的回收决策问题, 黄春香和李登峰[21] 和李登峰等[22] 分别研究了押金返还回收商和押金返还制造商时闭环供应链的利润分配问题.

上述研究均考虑单一政策工具的影响. 已有研究显示, 单一回收规制政策工具可能无法实现最大的社会福利、最小的环境影响和财政赤字等多重政策目标[23]. 因此, 政府在实践中倾向于通过实施不同政策组合以适应其需求. 王麒翔等[5] 以及王竟竟和许民利[14] 指出, 仅实施回收目标责任制时, 尽管该政策可以有效提升废弃物的回收水平, 但会对闭环供应链及成员的利润产生不利影响. 因此, 需要补充其他的政策工具来对供应链成员进行激励. Liu 等[4] 研究了回收目标责任制与回收处理基金相结合的双重规制政策对闭环供应链决策与绩效的影响. 然而, 我国废弃电器电子产品处理基金制度已停征, 该政策组合在当前制度背景下面临着适用性不足的问题. 消费者作为闭环供应链的起点, 是电器电子废弃物的主要来源, 其回收行为对废弃物流向具有决定性作用. 在这一背景下, 将面向消费者的押金返还制度与回收目标责任制相结合的政策组合是否能够产生政策协同效应, 成为一个亟待回答的问题.

消费者押金返还制度一方面通过提高消费者丢弃或者转向非正规回收渠道的机会成本来促进废弃物的回收, 另一方面也会增加消费者购买新产品时的初始支出, 进而可能抑制新产品的购买需求. 那么实施回收目标责任制和消费者押金返还的组合政策时, 消费者押金返还制度是否有助于生产企业实现回收目标责任制下的回收要求, 以及生产企业在强制回收约束下是否会通过价格或其他方式向消费者让利, 从而缓解消费者押金返还制度对新产品需求的抑制, 这些问题值得探讨. 此外, 消费者押金返还制度实施中, 由于部分废弃物未被返还, 往往会产生未赎回押金. 针对于这部分资金, 一些研究表明政府应保留未赎回押金, 若由生产企业保留押金, 社会最优条件无法实现, 也有研究表明政府应对未赎回押金进行分配, 以最大限度的促进废弃物的回收. 那么如何合理处理未赎回押金是一个重要且现实的研究问题. 基于此, 本文将回收目标责任制和消费者押金返还制度相结合, 考虑未赎回押金补贴或不补贴两种不同处置方式, 从运营决策层面评估押金返还制度作为配套政策工具的实施效果.

本文的边际贡献体现在以下方面. 首先, 揭示了回收目标责任制并非简单地目标回收率越高越有效. 研究发现, 提高目标回收率虽然能够强化制造商的回收责任, 但也可能推高新产品价格, 抑制新产品销量, 从而限制电子废弃物回收规模. 因此, 目标责任制存在环境目标与市场规模之间的内在权衡, 其实施效果具有一定边界条件. 其次, 揭示了目标回收率与消费者押金水平之间的协同关系. 研究发现, 适当的押金水平能够扩大企业采取全部回收策略的可行域, 降低系统对高目标回收率的依赖; 同时, 合理的目标回收率也能够增强押金返还制度的实施效果. 这说明双重回收规制中可以通过目标回收率与消费者押金水平的协同来强化单一政策的实施效果. 最后, 通过考察未赎回押金补贴机制, 分析其在缓解双重规制下环境绩效改善与企业利润损失之间矛盾中的作用, 从而拓展了押金返还制度下资金再配置与回收规制组合优化的研究视角.

1 问题描述与假设

本文考虑由制造商与电器电子废弃物回收处理商构成的二阶段闭环供应链. 制造商负责新产品的生产, 在生产者回收目标责任制约束下, 从消费者处回收电子废弃物, 并将其转移给回收处理商进行后续处理. 同时, 回收处理商也直接面向消费者回收电子废弃物, 并对来自消费者和制造商的电子废弃物进行拆解处理与资源化利用. 当政府对消费者实施押金返还制时, 消费者购买新产品时需要向政府缴纳固定押金, 并在产品生命周期结束或更新升级时, 将电子废弃物交由制造商或回收处理商回收可以获得押金返还, 若电子废弃物未被返还则会产生未赎回押金. 考虑到政府可能将未赎回押金用于补贴制造商和回收处理商的回收与拆解活动, 本文构建了以下三种情境下的决策模型: (1) 无回收规制模型 (NR 模型). 作为基准情形, NR 模型假设政府不实施任何回收规制政策. (2) 双重回收规制模型 (DRD 模型). 在该模型中, 政府同时实施回收目标责任制与消费者押金返还制度. (3) 双重回收规制且未赎回押金补贴模型 (NDR 模型). NDR 模型在政府实施回收目标责任制和消费者押金返还制度的基础上, 进一步考虑政府将未赎回押金用于补贴制造商和回收处理商回收与拆解活动的情形. 与本文相关的关键假设如下:

假设 1 在正向供应链中, 制造商生产新产品的成本为c, 并以零售价格p_n进行销售. 在逆向供应链中, 制造商以回收价格p_{mr}从消费者处回收电子废弃物, 并以转移价格p_t将其转移给回收处理商. 同时, 回收处理商也以回收价格p_{cr}直接向消费者回收电子废弃物, 其从消费者手中回收电子废弃物的单位回收成本为H. 鉴于回收处理商在专业化水平、技术能力及规模经济方面具有优势, 通常制造商的回收成本高于回收处理商的回收成本, 故假设制造商的回收成本为ρH, 这里$\rho \geqslant 1$. 假设回收处理商回收处理单位电子废弃物可以获得的残值为s.

假设 2 本文重点关注电子废弃物的逆向回收过程, 借鉴冯章伟等[24]、Zheng 等[25] 等文献, 假设回收处理商和制造商之间服从 Stackelberg 博弈, 其中回收处理商为博弈的领导者, 制造商为博弈的跟随者. 事实上, 一些大型电子废弃物回收处理商 (如格林美、爱回收、ReCellular 等) 在回收领域长期投入并深耕多年, 已经拥有了领先的产业基础、回收体系以及技术优势, 能够从所回收产品的再生材料中获得可观的经济补偿, 从而在回收领域相较制造商具有更强的市场势力与议价能力, 能够主导回收数量和转移价格, 并充当逆向渠道的领导者.

假设 3 假设新产品市场需求为销售价格与消费者押金的线性函数. 线性需求函数在供应链相关研究中被广泛采用, 如赵道致等[26]、李登峰等[22] 和 Li 等[27]. 由于押金本质上构成消费者的前期支付成本, 可能导致消费者购买价格的潜在上升. 假设对销售价格敏感的消费者对押金金额也具有相同的敏感性, 且敏感系数为 β. 当政府实施消费者押金返还制度时, 假设消费者在购买新产品时需缴纳固定押金$x, x \geqslant 0$, 并在返回电子废弃物时可获得全额退还. 则在无押金返还制度和有押金返还制度两种情形下, 新产品的需求函数分别为$q_n = \alpha - \beta p_n$和$q_n = \alpha - \beta p_n - \beta x$, 其中$\alpha$为潜在市场规模. 类似的设定在 Gong 等[28] 和 Guo 等[29] 中也有采用.

假设 4 按照当前的政策, 当政府实施回收目标责任制时, 制造企业按年度回收率 (年度回收率=年度回收量/前三年度平均销售量) 确定数量目标, 因此目标回收率通常设定为回收量与新产品销量的一定比例, 假设政府规定对制造商回收电子废弃物的目标回收率为$\eta, 1 \geqslant \eta \geqslant 0$, 则制造商回收的电子废弃物数量需满足$q_m \geqslant nq_n$.

假设 5 参考张川等[30] 和 Li 等[27], 假设电子废弃物的回收量为回收价格的线性函数, 并考虑制造商与回收处理商之间的回收竞争, 制造商和回收处理商的回收数量分别为$q_m = A + \gamma p_{mr} - \kappa p_{cr}$与$q_c = A + \gamma p_{cr} - \kappa p_{mr}$, 其中$A$为在既定电子废弃物存量条件下, 消费者在没有回收价格激励时仍愿意通过正规渠道无偿退还的电子废弃物数量, γ为消费者对回收价格的敏感性系数, κ为回收竞争强度. 引入消费者押金返还制度时, 参考 Gong 等[28] 和 Guo 等[29] 的设定, 押金机制会提高消费者的回收意愿, 且对回收价格敏感的消费者对退回押金具有相同的敏感性, 此时制造商与回收处理商的回收数量分别为$q_m = A + \gamma(p_{mr} + x) - \kappa(p_{cr} + x)$和 $q_c = A + \gamma(p_{cr} + x) - \kappa(p_{mr} + x)$.

假设 6 考虑将未赎回押金用于补贴逆向供应链成员情形时, 假设补贴制造商的比例为$\epsilon, 0 \leqslant \epsilon \leqslant 1$, 则补贴回收处理商的比例为$1 - \epsilon$. 当$\epsilon = 0$时, 表示未赎回押金全部用于补贴回收处理商.

假设 7 参考 Liu 等[4], 假设生产单位新产品、回收处理单位电子废弃物以及丢弃不处理单位电子废弃物的环境影响因子分别为$e_n, e_c, e_d, e_n \geqslant 0$, $e_c \geqslant 0, e_d \geqslant 0$, 则制造商的生产和回收活动, 以及回收处理商的回收处理活动对环境的影响可表示为:

$E = e_n q_n + e_c(q_m + q_c) + e_d(q_n - q_m - q_c)$, 经整理可得 $E = e_1 q_n - e_2(q_m + q_c)$, 其中 $e_1 = e_n + e_d$, $e_2 = e_d - e_c$, 且 $e_c < e_d$, $0 < e_2 < e_1$.

假设 8　设 π_i^j 表示供应链成员 i 在模型 j 下的利润, 这里 $i = m$ 表示制造商, $i = c$ 表示回收处理商, $j \in \{NR, DRD, NDR\}$. 不同模型下不同价格的均衡解用 p_k^{l*} 表示, 均衡解对应的销售量或者回收量用 q_k^{l*} 表示, 均衡解对应的环境影响用 E^{l*} 表示, $k \in \{n, cr, t, mr\}$, l 表示不同模型下的各种情形.

2　不同模式下的模型构建与均衡解

2.1　无回收规制模型 (NR 模型)

在 NR 模型下, 政府不实施回收目标责任制和消费者押金返还制度. 由于回收处理商为 Stackelberg 博弈的领导者, 制造商为跟随者, 不同成员的博弈顺序如下: 首先, 回收处理商决定电子废弃物的回收价格 p_{cr} 和回收转移价格 p_t, 然后, 制造商根据回收处理商的决策, 确定新产品的零售价格 p_n 和电子废弃物的回收价格 p_{mr}. 则回收处理商和制造商的利润最大化决策模型为:

$$\begin{aligned}
&\max_{p_t, p_{cr}} {\pi_c}^{NR} = (s - p_t)q_m + (s - p_{cr} - H)q_c \\
&\max_{p_n, p_{mr}} {\pi_m}^{NR} = (p_n - c)q_n + (p_t - p_{mr} - \rho H)q_m \\
&s.t.\ q_m + q_c \leqslant q_n; q_m \geqslant 0; q_c \geqslant 0.
\end{aligned} \tag{1}$$

在模型 (1) 中约束条件 $q_m + q_c \leqslant q_n$ 表示电子废弃物的回收数量受新产品销量的约束. 采用逆向递推归纳法求解以上博弈模型, 可得如下定理.

定理 1　当无回收规制政策干预时, 制造商和回收处理商的价格决策均衡解如表 1 所示.

表 1　NR 模型下最优价格决策均衡解

模型NR	p_n	p_{cr}	p_t	p_{mr}
情形 NL($g_1 \leqslant 0$)	$\frac{\alpha + c\beta}{2\beta}$	$\frac{1}{2}(-H + s + \frac{A}{-\gamma + \kappa})$	$\frac{1}{2}(s + \frac{A}{-\gamma + \kappa} + H\rho)$	$\frac{A(-3\gamma + \kappa) + (\gamma - \kappa)(s(\gamma + \kappa) - H(\kappa + \gamma\rho))}{4\gamma(\gamma - \kappa)}$
情形 NA($g_1 > 0$)	$\frac{\alpha + c\beta}{2\beta}$	$\frac{(\gamma(2\alpha - 2c\beta + H(\gamma - \kappa)(-1 + \rho)) - 2A(3\gamma + \kappa))}{2(\gamma - \kappa)(3\gamma + \kappa)}$	$(-2\alpha\gamma + 2c\beta\gamma - 2H\gamma^2 + H\gamma\kappa + H\kappa^2 + 2A(3\gamma + \kappa) - H(\gamma - \kappa)(4\gamma + \kappa)\rho) - \frac{}{2(\gamma - \kappa)(3\gamma + \kappa)}$	$(-c\beta\gamma + H\gamma^2 - c\beta\kappa - H\gamma\kappa + \alpha(\gamma + \kappa) - 2A(3\gamma + \kappa) + H\gamma(-\gamma + \kappa)\rho) \frac{}{2(\gamma - \kappa)(3\gamma + \kappa)}$

注: $g_1 = ((3\gamma + \kappa)(A + s(\gamma - \kappa)) - H(\gamma - \kappa)(\kappa + \gamma(2 + \rho)) - 2\gamma(\alpha - c\beta))$.

定理 1 中情形 NA 下的均衡解满足 $q_m + q_c = q_n$, 表明制造商和回收处理商将对销售新产品所产生的全部电子废弃物进行回收处理, 下文将该情形记为制造商和回收处理商共同采取全部回收策略. 而在情形 NL 下, 均衡解满足 $q_m + q_c < q_n$, 表明制造商和回收处理商仅对销售新产品所产生的部分电子废弃物进行回收处理, 下文将该情形记为制造商和回收处理商共同采取部分回收策略. 由两种情形划分阈值 g_1 的表达式可以看出, 从逆向回收视角来看, 随着愿意免费回收的消费者数量 A 或电子废弃物残值 s 的增加, 或者单位电子废弃物回收投入成本 H 的降低, 阈值 g_1 的取值均会增大. 这表明, 随着电子废弃物回收市场的潜在收益增加, 制造商和回收处理商的共同回收策略会由部分回收策略转向全部回收策略. 从正向销售视角来看, 随着新产品潜在市场规模 α 的降低, 或新产品单位生产成本 c 的提高, 阈值 g_1 的取值同样会增大. 这表明, 当新产品销售市场的潜在收益下降时, 闭环供应链成员会通过强化逆向回收来弥补收益, 从而也会由部分回收策略转向全部回收策略. 可见, 在不存在政府回收规制政策干预的情形下, 电子废弃物回收市场与新产品销售市场的潜在收益水平是影响闭环供应链成员回收策略选择的关键因素.

2.2　双重回收规制模型 (DRD 模型)

DRD 模型中, 政府实施回收目标责任制, 要求制造商对电子废弃物进行回收并达到规定的目标回收率. 同时, 政府实施押金返还制度, 规定消费者购买新产品时需向政府缴纳固定金额的押金, 在产品报废或升级时退还电子废弃物后可退还押金. DRD 模型中各成员博弈顺序与 NR 模型一致, 则回收处理商和制造商的利润最大化决策模型为:

$$\begin{aligned}
&\max_{p_t, p_{cr}} \pi_c^{DRD} = (s - p_t)q_m + (s - p_{cr} - H)q_c \\
&\max_{p_n, p_{mr}} \pi_m^{DRD} = (p_n - c)q_n + (p_t - p_{mr} - \rho H)q_m \\
&\text{s.t. } q_m \geqslant \eta q_n; q_m + q_c \leqslant q_n;\ q_m \geqslant 0;\ q_c \geqslant 0.
\end{aligned} \tag{2}$$

模型 (2) 中约束条件 $q_m \geqslant nq_n$ 为制造商的电子废弃物回收数量受政府目标回收率 η 的约束. 利用逆向递推归纳法求解上述博弈模型可得如下结论.

定理 2　当政府实施回收目标责任制和消费者押金返还制度时, 制造商和回收处理商的价格决策均衡解如表 2 所示.

表 2 DRD 模型下最优价格决策均衡解

模型DRD	p_n	p_{cr}	p_t	p_{mr}
情形PL$(t_1 \geqslant 0, t_2 \geqslant 0)$	$\frac{\alpha+\beta(c-x)}{2\beta}$	$\frac{1}{2}(s-x-H+\frac{A}{\kappa-\gamma})$	$\frac{1}{2}(s-x+\frac{A}{\kappa-\gamma}+H\rho)$	$\frac{A(\kappa-3\gamma)+(\gamma-\kappa)(x(\kappa-3\gamma)+s(\gamma+\kappa)-H(\kappa+\gamma\rho))}{4\gamma(\gamma-\kappa)}$
情形PA$(t_1 < 0, t_3 \geqslant 0)$	$\frac{\alpha}{2\beta}+\frac{1}{2}(c-x-\frac{\eta t_1}{\gamma+2\beta\eta^2})$	$\frac{1}{2}\left(s-H-x+\frac{A}{\kappa-\gamma}\right)$	$\frac{1}{2}(s-x+\frac{A}{\kappa-\gamma}+H\rho+\frac{t_1}{\gamma+2\beta\eta^2})$	$(\frac{1}{4\gamma}((x-H)\kappa+s(\gamma+\kappa)-H\gamma\rho)-\frac{3x}{4}-\frac{t_1}{4(\gamma+2\beta\eta^2)}+\frac{A(\kappa-3\gamma)}{4\gamma(\gamma-\kappa)})$
情形PP$(t_2 < 0, t_4 \geqslant 0)$	$\frac{\alpha+c\beta-x\beta}{2\beta}$	$\frac{1}{2}(s-x-H+\frac{t_2-A(3\gamma+\kappa)}{(\gamma-\kappa)(3\gamma+\kappa)})$	$\frac{1}{2}(s-x+H\rho+\frac{t_2-A(3\gamma+\kappa)}{(\gamma-\kappa)(3\gamma+\kappa)})$	$\frac{1}{4\gamma}(\frac{t_2(\gamma+\kappa)}{(\gamma-\kappa)(3\gamma+\kappa)}+\frac{A(\kappa-3\gamma)}{(\gamma-\kappa)}+x(\kappa-3\gamma)+s(\gamma+\kappa)-H(\kappa+\gamma\rho))$
情形PN$(t_3 < 0, t_4 < 0)$	$\frac{1}{2}(c-x+\frac{\alpha}{\beta}-\frac{t_4\eta}{t_5})$	$\frac{1}{2}(s-x-H+\frac{A}{\kappa-\gamma}+\frac{t_3}{(\gamma-\kappa)t_5})$	$\frac{(t_3-At_5+(\gamma-\kappa)(t_4+t_5(s-x+H\rho))}{2t_5(\gamma-\kappa)}$	$\frac{1}{4t_5\gamma}(\frac{At_5(\kappa-3\gamma)+t_3(\gamma+\kappa)}{\gamma-\kappa}-t_4\gamma-H\gamma\rho-t_5(3x\gamma+H\kappa-x\kappa-s(\gamma+\kappa)))$

t_1, t_2, t_3, t_4, t_5为模型 (2) 基于 KKT 条件确定的情形划分临界阈值.

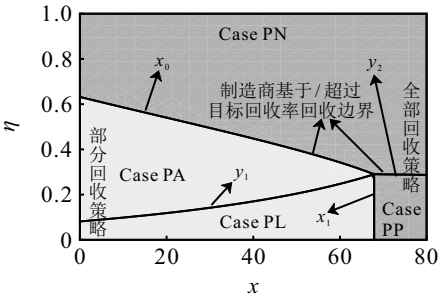
上述定理 2 中, 为使回收量及回收价格大于零还需要满足$t_5 = \gamma(\gamma+\beta\eta(-1+3\eta))+(\gamma+\beta\eta^2)\kappa > 0$, 本文假设该条件总是成立. 特别地, 上述定理中取$x = 0$, 即可得到政府仅实施回收目标责任制下供应链成员的均衡决策; 取$\eta = 0$, 即可得到政府仅实施消费者押金返还制度下供应链成员的均衡决策.

定理 2 给出了四种情形下的回收策略. 在情形 PL 中, 模型取得全局最优解, 且最优解满足$q_m > \eta q_n$和$q_m + q_c < q_n$, 表明制造商的回收率超过政府规定的目标回收率, 但制造商和回收处理商仅对新产品所产生的部分电子废弃物进行回收, 即双方共同采取部分回收策略. 在情形 PA、情形 PP 和情形 PN 中, 模型均取得局部最优解. 其中, 情形 PA 下的最优解满足$q_m = \eta q_n$和$q_m + q_c < q_n$, 表明制造商仅按照政府规定的目标回收率进行回收, 同时制造商和回收处理商仅对新产品所产生的部分电子废弃物进行回收, 即双方共同采取部分回收策略; 情形 PP 下的最优解满足$q_m > \eta q_n$和$q_m + q_c = q_n$, 表明制造商的回收率超过政府规定的目标回收率, 且制造商和回收处理商对新产品所产生的全部电子废弃物进行回收, 即双方共同采取全部回收策略; 情形 PN 下的最优解满足$q_m = \eta q_n$和$q_m + q_c = q_n$, 表明制造商仅按照目标回收率进行回收, 但制造商和回收处理商对新产品所产生的全部电子废弃物进行回收, 即双方同样采取全部回收策略.

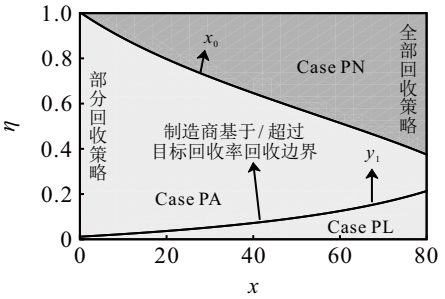
可见, 与未实施回收规制政策的情形相比, 在实施双重回收规制政策时, 制造商与回收处理商总体上仍将采取部分回收或者全部回收的策略. 然而, 由于目标回收率的强制性约束, 制造商可能选择基于或者超过目标回收率的回收策略, 从而使价格均衡解的结构更加复杂. 此外, 在未实施回收规制政策时, 不同价格均衡决策及回收策略的区域划分主要受电子废弃物残值、回收投入成本、新产品潜在市场规模以及生产成本等因素的影响, 而实施双重回收规制政策后, 不同价格均衡决策和回收策略的区域划分还受目标回收率和消费者押金水平的共同制约. 基于此, 下面结合图示进一步分析目标回收率和消费者押金水平对不同回收策略的影响.

图 1 展示了不同电子废弃物残值水平下, DRD 模型中博弈均衡的四种情形在目标回收率和消费者押金构成的二维参数空间中的存在区间. 图 1(a) 对应高残值情形 (即$s = 120$), 此时定理 2 中的四种情形均有出现; 图 1(b) 对应低残值情形 (即$s = 50$), 此时仅三种情形出现, 即电子废弃物回收残值较低时, 情形 PP 不再出现, 只有当消费者押金进一步提高时, 该情形才有可能重新出现.

结合定理 2 与图 1, 从回收目标责任制的角度来看, 当目标回收率低于某阈值时, 即满足$t_1 \geqslant 0$且$t_4 \geqslant 0$, 即$\eta \leqslant y_1$且$\eta \leqslant y_2$(y_1、y_2为求解上述不等式组确定的目标回收率临界阈值), 制造商会选择超过目标回收率回收电子废弃物, 反之, 制造商通常仅按照政府规定的目标回收率进行回收. 该回收决策阈值与消费者缴纳的押金密切相关, 且随着消费者缴纳押金x的增加, 阈值y_1和y_2都会增加, 即制造商选择超过目标回收率回收废弃物的可行域会扩大, 而仅基于目标回收率进行回收的可行域相应缩小, 表明制造商的回收积极性增强. 进一步地, 由图 1 可知, 随着消费者押金x的增加, 制造商和回收商共同采取全部回收策略的可行域会扩大, 即相比单一的回收目标责任制, 引入消费者押金返还制度后, 制造商和



(a)　$s=120$



(b)　$s=50$

图 1　DRD 模型下不同均衡情形在参数空间中的区域划分 ($\alpha=500; \beta=2.5; A=0; \rho=1.2; c=60; \gamma=1; H=30; \kappa=0.3$)

回收商共同采取全部回收策略的可行域会扩大. 特别地, 当x的增加到一定水平时 (图 1 中对应为 $x=X_1$), 即使不实施目标回收率 ($\eta=0$), 电子废弃物仍能实现全部回收.

从消费者押金返还制度的角度来看, 当消费者缴纳的押金高于某一阈值时, 即满足$t_2<0$或$t_3<0$, 也即$X_1<x$或$X_0<x$(X_0、X_1为求解上述不等式组确定的消费者押金额临界阈值), 制造商和回收处理商会共同采取全部回收的策略; 反之, 双方会采取部分回收策略. 进一步由图 1 可知, 随着目标回收率η的提高, 阈值X_0将逐渐降低, 意味着制造商和回收处理商共同采取全部回收策略的可行域进一步扩大, 即相比单一的消费者押金返还制度, 与生产者回收目标责任制结合后, 制造商和回收商共同采取全部回收策略的可行域会扩大. 特别地, 当目标回收率增加到一定水平时, 即使不实施押金返还制度 ($x=0$), 制造商和回收处理商仍会共同采取全部回收策略, 但此时仅当政府设定的目标回收率较低时 ($\eta \leqslant \dfrac{A+H\kappa+(\gamma-\kappa)s-H\gamma\rho}{2\alpha-2(c+x)\beta}$), 制造商才会选择超过目标回收率进行回收; 否则, 制造商通常仅完成政府强制的回收目标.

综合来看, 从图 1 可知, 在政府仅实施单一回收规制政策的情形下, 若要促使制造商和回收商共同采取全部回收的策略, 政府要么需要设定较高的目标回收率, 要么需要制定较高的消费者押金. 由图 1(b) 可知, 当电子废弃物的残值较小时, 制造商和回收处理商共同采取全部回收策略的可行区域 (深色阴影区域) 会显著缩小. 此时, 若政府仅采用单一的回收目标责任制 ($x=0$), 则只有在设定最高的回收目标率 ($\eta=1$), 电子废弃物才能实现全部回收, 否则全部回收难以实现, 从而使政策实施效果受限. 然而, 如果政府实施回收目标责任制并引入消费者押金返还制度时, 无论目标回收率取何水平 ($0<\eta<1$), 只要辅以相应的消费者押金 ($X_1<x$或$X_0<x$), 均可实现电子废弃物的全部回收. 即便在电子废弃物残值较低的情况下, 政府也仅需要通过提高目标回收率或者消费者押金, 即可促使制造商或者回收处理商采取全部回收策略. 因此, 在电子废弃物本身残值有限的情形下, 政府实施回收目标责任制和消费者押金返还制度相结合的组合政策, 能够有效激励电子废弃物回收, 并显著提升政策实施效果.

推论 1　(1) 新产品销售价格p_n随着押金x增加而减少, 随着电子废弃物残值s单调不增; (2) 制造商回收电子废弃物的回收价格p_{mr}随着押金x增加而减少, 随着电子废弃物残值s单调不增; (3) 回收处理商回收电子废弃物的回收价格p_{cr}随着押金x增加而减少, 随着电子废弃物残值s单调不增.

购买新产品时缴纳押金会增加消费者的当前支出, 故随着押金值的增加, 消费者的购买意愿会降低, 制造商通常会降低新产品的销售价格来提升消费者的购买意愿. 同时, 一方面, 为了弥补新产品销售价格降低带来的利润损失, 制造商也会降低电子废弃物的回收价格来增加回收利润. 由于存在回收竞争, 回收处理商也会降低电子废弃物的回收价格. 另一方面, 随着消费者押金的增加, 消费者退回电子废弃物时获得的价值增加, 故制造商和回收处理商可以以更低的价格来激励消费者回收, 故回收价格会降低. 与已有研究结论[27] 一致的是, 当电子废弃物的残值增加时, 制造商和回收处理商通常会提高电子废弃物的回收价格, 同时降低新产品的销售价格. 然而, 在制造商和回收处理商共同采取全部回收策略 ($q_{mr}+q_{cr}=q_n$)的情形下, 回收价格和销售价格均与残值无关.

推论 2　(1) 新产品销量q_n随着押金x的增加而减少; (2) 在 PL 情形下, 制造商的电子废弃物回收量q_m随着押金x的增加而增加, 在其他情形下, 随着押金x的增加而减少; (3) 在 PL 和 PA 情形下, 回收处理商的电子废弃物回收量q_c随着押金x的增加而增加, 在其他情形下, 随着押金x的增加而减少; (4) 在 PL 和 PA 情形下, 总回收量q随着押金x增加而增加,

在其他情形下, 随着押金x的增加而减少; (5) 新产品的销量、制造商和回收处理商的回收量均随着电子废弃物残值s单调不减.

推论 2 表明, 电子废弃物残值的提高始终有助于提高供应链整体及其各成员的回收量. 与此同时, 正如 Guo 等[29] 指出的, 消费者押金返还制度对产品销售会产生负面影响, 推论 2 表明消费者押金返还制度对新产品销售具有抑制作用, 且随着押金额的增加, 这种抑制作用会更加明显. 在部分回收情形下, 若制造商选择超过目标回收率进行回收时 (情形 PL), 通常对应的是政府设立的目标回收率较低, 在这种情况下, 提高消费者的押金额能够有效激励制造商和回收处理商增加回收量, 从而提升供应链的回收水平. 然而, 随着目标回收率的逐步提高, 制造商将由超额回收转向按照目标回收率回收 (情形 PA), 此时制造商的回收量主要受新产品销售规模的制约, 而押金额的提升会抑制新产品销量, 进而导致制造商的回收量下降. 尽管如此, 回收处理商的回收量以及供应链整体回收量仍会随着押金额的提高而增加. 在全部回收情形下, 制造商和回收处理商的回收量均主要由新产品销量所决定, 因此, 押金额的提高通过抑制新产品销售, 将导致其回收量下降. 基于此, 在该情形下, 政府只需设定一个足够高的最低押金额, 即可确保电子废弃物实现全部回收, 而无须持续提高押金水平.

推论 3 环境影响E会随着押金x增加而减少.

推论 3 表明消费者押金返还制度的实施均有助于降低环境影响, 且随着押金额的提高, 对环境的影响会呈现持续下降趋势.

推论 4 制造商的利润随着押金x的增加而减少, 随着电子废弃物残值s单调不减. 回收处理商的利润随押金x的变化趋势与参数的取值有关, 随着电子废弃物残值s单调递增.

推论 4 表明, 消费者押金返还制度总是会损害制造商的利益, 但在某些情况下, 它可能对回收处理商有利. 而电子废弃物的残值越高, 制造商和回收处理商的利润也越高.

2.3 双重回收规制且未赎回押金补贴模型 (NDR 模型)

NDR 模型中政府将未赎回押金用于补贴制造商和回收处理商在回收系统构建、运行、回收技术创新等活动. 此时新产品的销售量和电子废弃物的回收量与 DRD 模型一致. 回收处理商和制造商的利润最大化决策模型如下:

$$\begin{aligned}&\max_{p_t,p_{cr}}\pi_c^{NDR}=(s-p_t)q_m+(s-p_{cr}-H)q_c+\\&\qquad x(1-\epsilon)(q_n-q_m-q_c)\\&\max_{p_n,p_{mr}}\pi_m^{NDR}=(p_n-c)q_n+x\epsilon(q_n-q_m-q_c)+\\&\qquad(p_t-p_{mr}-\rho H)q_m\\&s.t.\ q_m\geqslant\eta q_n\ q_m+q_c\leqslant q_n;\ q_m\geqslant 0;\ q_n\geqslant 0.\end{aligned}\tag{3}$$

模型 (3) 中$x(1-\epsilon)(q_n-q_m-q_c)$是政府对回收处理商拆解处理电子废弃物的补贴, $x\epsilon(q_n-q_m-q_c)$是政府对制造商回收电子废弃物的补贴. 利用逆向递推归纳法求解上述博弈模型可得如下结论.

定理 3 当政府实施回收目标责任制和消费者押金返还制度, 且将未赎回押金补贴给制造商和回收处理商时, 制造商和回收处理商的价格决策均衡解如表 3 所示.

表 3 NRD 模型下最优价格决策均衡解

模型NRD	p_n	p_{cr}	p_t	p_{mr}
情形DL $(h_1\geqslant 0,h_2\geqslant 0)$	$\frac{\alpha+\beta(c-x(1+\epsilon))}{2\beta}$	$\frac{1}{2}(s+x(\epsilon-2)-H+\frac{A}{\kappa-\gamma})$	$\frac{1}{2}s+\frac{A}{\kappa-\gamma}+H\rho+x(2\epsilon-2-\frac{\epsilon\kappa}{\gamma}))$	$\frac{(A(-3\gamma+\kappa)+(\gamma-\kappa)(s(\gamma+\kappa)+x(-4\gamma+2\epsilon\kappa)-H(\kappa+\gamma\rho))}{4\gamma(\gamma-\kappa)}$
情形DA $(h_1<0,h_3\geqslant 0)$	$\frac{1}{2}(\frac{\alpha}{\beta}-\frac{h_1\eta}{\gamma+2\beta\eta^2}+c-x(1+\epsilon))$	$\frac{1}{2}(s-H+x(\epsilon-2)+\frac{A}{\kappa-\gamma})$	$\frac{1}{2}(s+\frac{h_1}{\gamma+2\beta\eta^2}+\frac{A}{\kappa-\gamma}+x(2\epsilon-2-\frac{\epsilon\kappa}{\gamma})+H\rho)$	$\frac{1}{4\gamma}(\frac{A(\kappa-3\gamma)}{\gamma-\kappa}-\frac{h_1\gamma}{\gamma+2\beta\eta^2}+s(\gamma+\kappa)+x(2\epsilon\kappa-4\gamma)-H(\kappa+\gamma\rho))$
情形DP $(h_2<0,h_4\geqslant 0)$	$\frac{\alpha+\beta(c-x(1+\epsilon))}{2\beta}$	$\frac{1}{2}(s-H+x(\epsilon-2)+\frac{h2-A(3\gamma+\kappa)}{(\gamma-\kappa)(3\gamma+\kappa)})$	$\frac{1}{2}(\frac{h_2-A(3\gamma+\kappa)}{(\gamma-\kappa)(3\gamma+\kappa)}-\frac{x\epsilon\kappa}{\gamma}+s+2x(\epsilon-1)+H\rho)$	$\frac{1}{4\gamma}(\frac{h_2(\gamma+\kappa)}{(\gamma-\kappa)(3\gamma+\kappa)}+\frac{A(\kappa-3\gamma)}{(\gamma-\kappa)}+s(\gamma+\kappa)+x(2\epsilon\kappa-4\gamma)-H(\kappa+\gamma\rho))$
情形DN $(h_3<0,h_4<0)$	$\frac{1}{2\beta}(\alpha+\beta(c-x(1+\epsilon)-\frac{h_4\eta}{t_5}))$	$\frac{1}{2}(s-H+x(\epsilon-2)+\frac{h_3-At_5}{t_5(\gamma-\kappa)})$	$\frac{1}{2}(s+\frac{h_4}{t_5}+\frac{h_3-At_5}{t_5(\gamma-\kappa)}+x(2\epsilon-2-\frac{\epsilon\kappa}{\gamma})+H\rho)$	$\frac{1}{4t_5\gamma}(\frac{At_5(\kappa-3\gamma)+h_3(\gamma+\kappa)}{(\gamma-\kappa)}-h_4\gamma-t_5(4x\gamma+H\kappa-2x\epsilon\kappa-s(\gamma+\kappa)+H\gamma\rho))$

h_1,h_2,h_3,h_4为模型 (3) 基于 KKT 条件确定的情形划分临界阈值.

类似定理 2, 定理 3 包含以下四种情形: 情形 DL 表示制造商回收率会超过目标回收率, 且制造商和回收处理商共同采取部分回收策略; 情形 DA 表示制造商基于目标回收率进行回收, 且制造商和回收处理商共同采取部分回收策略; 情形 DP 表示制造商回收率超过目标回收率, 且制造商与回收处理商共同采取全部回收策略; 情形 DN 表示制造商基于目标回收率进行回收, 且制造商和回收处理商共同采取全部回收策略.

推论 5 新产品的价格p_n随着制造商补贴比例ϵ的提高而单调递减; 制造商回收价格p_{mr}则随着制造商补贴比例ϵ单调递增, 回收处理商回收价格p_{cr}也随之单调递增.

由推论 5 可知, 当将未赎回押金用于补贴制造商和回收处理商时, 随着制造商补贴比例的增加, 制造商会降低新产品价格以刺激消费者购买, 同时提高回收价格以鼓励消费者退回电子废弃物. 由于回收市场存在竞争, 回收处理商也会相应提高回收价格以维持市场份额.

推论 6 新产品销量q_n随着制造商补贴比例ϵ的增加而单调递增; 制造商回收的电子废弃物数量q_m则随着制造商补贴比例ϵ单调不减; 回收处理商回收的电子废弃物数量q_c, 除 DA 情形外, 其他情形均随制造商补贴比例ϵ单调递增; 电子废弃物总回收量q也随着制造商补贴比例ϵ提高而单调递增.

根据推论 5 和推论 6, 随着制造商补贴比例增加, 制造商和回收处理商采取的价格策略大部分情形下会提升新产品销量以及电子废弃物的回收量.

推论 7 除 DA 情形外, 环境影响E会随着制造商补贴比例ϵ的增加而增加.

尽管提高制造商补贴比例能够促进电子废弃物回收量与新产品销量的提高, 但由于生产新产品增加的环境影响通常大于回收电子废弃物降低的环境影响, 对环境的总负担在大多数情况下会随着制造商补贴比例的增加而加重. 因此, 从环境效益的角度来看, 应适当降低未赎回押金对制造商的补贴比例, 同时增加对回收处理商的补贴比例, 以更有效地减轻环境压力.

2.4 DRD 模型和 NDR 模型对比分析

通过对 DRD 模型和 NDR 模型的均衡解及阈值进行对比分析, 可得如下结论.

推论 8 (1) DRD 模型和 NDR 模型下新产品价格满足: $p_n^{PL*} > p_n^{DL*}$, $p_n^{PP*} > p_n^{DP*}$, $p_n^{PN*} > p_n^{DN*}$, 当$\epsilon \geqslant \dfrac{\gamma\eta - \eta\kappa}{\gamma}$时, $p_n^{PA*} > p_n^{DA*}$, 反之亦成立;

(2) DRD 模型和 NDR 模型下制造商回收电子废弃物价格满足: $p_{mr}^{PL*} > p_{mr}^{DL*}$, $p_{mr}^{PP*} < p_{mr}^{DP*}$, $p_{mr}^{PN*} < p_{mr}^{DN*}$, 当 $\epsilon \geqslant \dfrac{\beta\gamma\eta^2 + \gamma\kappa + \beta\eta^2\kappa}{\beta\gamma\eta + \gamma\kappa + 2\beta\eta^2\kappa}$时, $p_{mr}^{PA*} < p_{mr}^{DA*}$, 反之亦成立;

(3) DRD 模型和 NDR 模型下回收处理商回收电子废弃物价格满足: $p_{cr}^{PL*} > p_{cr}^{DL*}$, $p_{cr}^{PA*} > p_{cr}^{DA*}$, $p_{cr}^{PP*} < p_{cr}^{DP*}$, $p_{cr}^{PN*} < p_{cr}^{DN*}$.

推论 8 表明, 在全部回收策略 (情形 PP、情形 PN 以及情形 DP、情形 DN) 下, 相较于未补贴情形, 当政府将未赎回押金补贴给制造商和回收处理商时, 制造商会降低新产品的销售价格来激励消费者购买, 并提高电子废弃物的回收价格来激励消费者进行回收, 且由于政府对回收处理商的补贴, 回收处理商也会提高回收价格来激励消费者进行回收. 在部分回收策略下, 若制造商选择超过目标回收率进行回收 (情形 PL 和情形 DL), 通常意味着政府设定的目标回收率较低, 强制回收约束未发挥实质性作用, 制造商能够较为容易地满足回收要求, 相较于未补贴情形, 此时若将未赎回押金补贴给制造商和回收处理商, 制造商仍然会降低新产品价格来激励购买, 但其会降低回收价格来获取更高的利润, 由于回收市场的竞争, 回收处理商也会降低回收价格; 而当制造商基于目标回收率进行回收时 (情形 PA 和情形 DA), 制造商需要付出额外努力才能达到政府规定的目标回收率, 此时 DRD 模型和 NDR 模型下的价格决策差异将受到目标回收率水平、补贴比例等参数取值的影响.

推论 9 (1) DRD 模型和 NDR 模型下新产品销售量满足: $q_n^{PL*} < q_n^{DL*}$, $q_n^{PP*} < q_n^{DP*}$, $q_n^{PN*} < q_n^{DN*}$, 当$\epsilon \geqslant \dfrac{\gamma\eta - \eta\kappa}{\gamma}$时, $q_n^{PA*} \leqslant q_n^{DA*}$, 反之亦成立;

(2) DRD 模型和 NDR 模型下制造商电子废弃物回收量满足: $q_m^{PL*} > q_m^{DL*}$, $q_m^{PP*} < q_m^{DP*}$, $q_m^{PN*} < q_m^{DN*}$, 当$\epsilon \geqslant \dfrac{\gamma\eta - \eta\kappa}{\gamma}$时, $q_m^{PA*} \leqslant q_m^{DA*}$, 反之亦成立;

(3) DRD 模型和 NDR 模型下回收处理商电子废弃物回收量满足: $q_c^{PP*} < q_c^{DP*}$, $q_c^{PN*} < q_c^{DN*}$;

(4) DRD 模型和 NDR 模型下的环境影响满足: $E^{PL*} \leqslant E^{DL*}$, $E^{PP*} \leqslant E^{DP*}$, $E^{PN*} \leqslant E^{DN*}$.

推论 9 表明, 在全部回收策略 (情形 PP、情形 PN 与情形 DP、情形 DN) 下, NDR 模型中新产品销量总是高于 DRD 模型, 由于此时制造商和回收处理商电子废弃物的总回收量等于新产品销量, 因此, NDR 模型下的电子废物回收量也高于 DRD 模型.

然而, 在部分回收策略下, 两种模型中新产品销量和电子废弃物回收量之间的差异取决于参数设定. 此外, 除情形 PA 与情形 DA 外, NDR 模型对环境造成的负面影响总体上高于 DRD 模型.

推论 10 DRD 模型边界和 NDR 模型边界满足以下关系: $t_1 \geqslant h_1$, $t_2 \leqslant h_2$, $t_3 \leqslant h_3$, 当 $\eta > \dfrac{\beta\gamma - \gamma^2 + \kappa^2}{\beta(3\gamma + \kappa)}$ 时, $t_4 - h_4 > 0$, 反之, 当 $\eta \leqslant \dfrac{\beta\gamma - \gamma^2 + \kappa^2}{\beta(3\gamma + \kappa)}$ 时, $t_4 - h_4 \leqslant 0$. 即在 NDR 模型下全部回收策略的可行域小于 DRD 模型全部回收策略的可行域, 如图 2 所示.

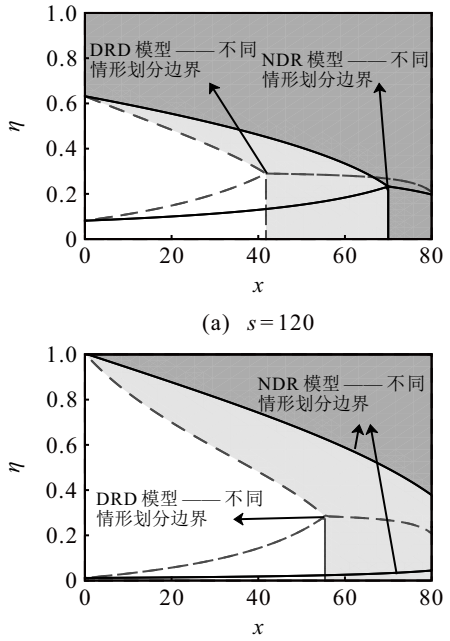


图 2 DRD 模型和 NDR 模型阈值对比 ($\alpha = 500; \beta = 2.5; A = 0; \rho = 1.2; c = 60; \gamma = 1; H = 30; \kappa = 0.3; \epsilon = 0.2$)

推论 10 指出, 政府将未赎回押金作为对制造商和回收处理商的回收补贴时, 全部回收策略的可行区域会缩小. 其根本原因在于, 补贴机制会激励制造商通过降低新产品价格并增加新产品的销量来提高利润, 而新产品销量的增加反而提高了实现全部回收的难度, 从而压缩了全部回收策略的可行范围.

3 数值模拟

本节采用数值算例分析三种模型下目标回收率 η 对均衡决策及供应链利润的影响, 并比较不同模型下供应链整体及成员的利润.

3.1 目标回收率 η 的敏感性分析

为分析目标回收率对均衡解及利润的影响, 此处取 $\alpha = 500, \beta = 2.5, A = 0, \rho = 1.2, c = 60, \gamma = 1, H = 30, \kappa = 0.3, \epsilon = 0.2, x = 10, s = 120$. 此外, 为分析目标回收率变化对环境的影响, 参考文献 Liu 等[4], 取 $e_1 = 0.55$, $e_2 = 0.01$, 模拟结果如图 3-图 5 所示. 为更直观地展示 DRD 模型与 NDR 模型差异, 各图均嵌入了 DRD 模型和 NDR 模型均衡解与利润的差值示意图.

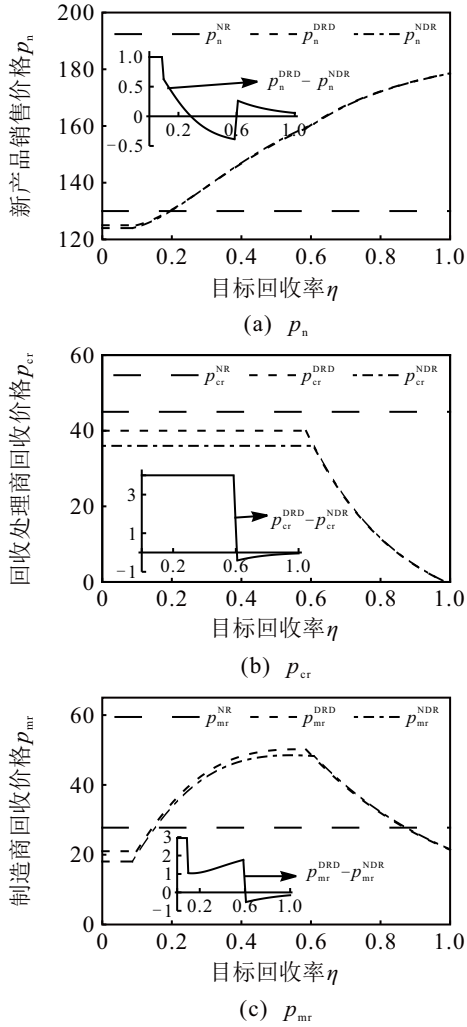


图 3 目标回收率 η 对不同模型下价格均衡解的影响

由图 3 和图 4 可知, 当政府同时实施回收目标责任制和消费者押金返还制度 (即 DRD 模型和 NDR 模型) 时, 当目标回收率较低 (DRD 模型满足 $t_1 \geqslant 0$ 且 $t_2 \geqslant 0$, NDR 模型 $h_1 \geqslant 0$ 且 $h_2 \geqslant 0$) 时, 强制回收约束未发挥实质性作用, 目标回收率对制造商和回收处理商的价格决策没有影响; 随着目标回收率的不断提高, 强制回收约束开始生效, 制造商需要采取相应措施以履行回收责任. 一方面, 由于制造商要达成的目标回收量受新产品规模的限制, 在严格的目标回收率约束下, 制造商会增加新产品的销售价格来提高利润并降低新产品销量, 从而降低目标回收量以履行其环境责任, 该结果与王麒翔等[5]中的研究结论一致. 另一方面, 制造商会通过提高电子废弃物的回收价格来激励消费者回收以实现目标回收率. 然而, 随着目标回收率进一步提高, 新产品

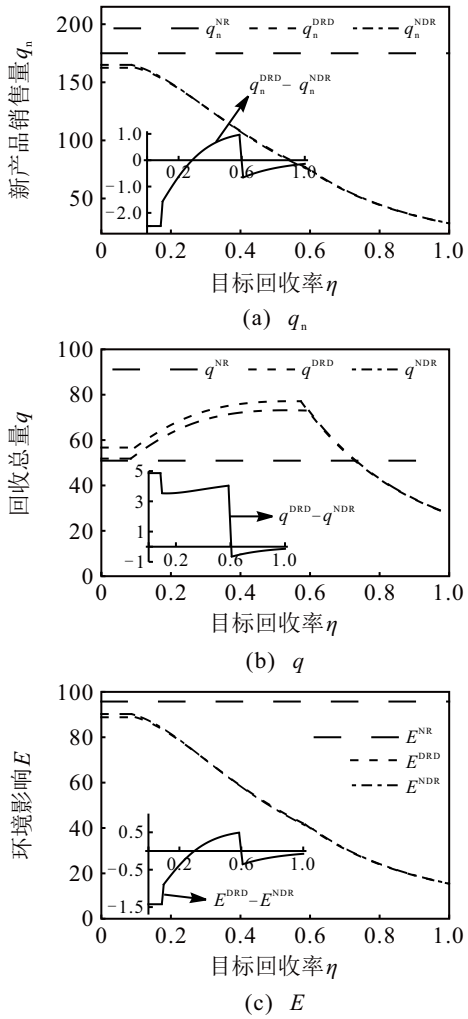


图 4　目标回收率η对不同模型下销售量、回收总量和环境的影响

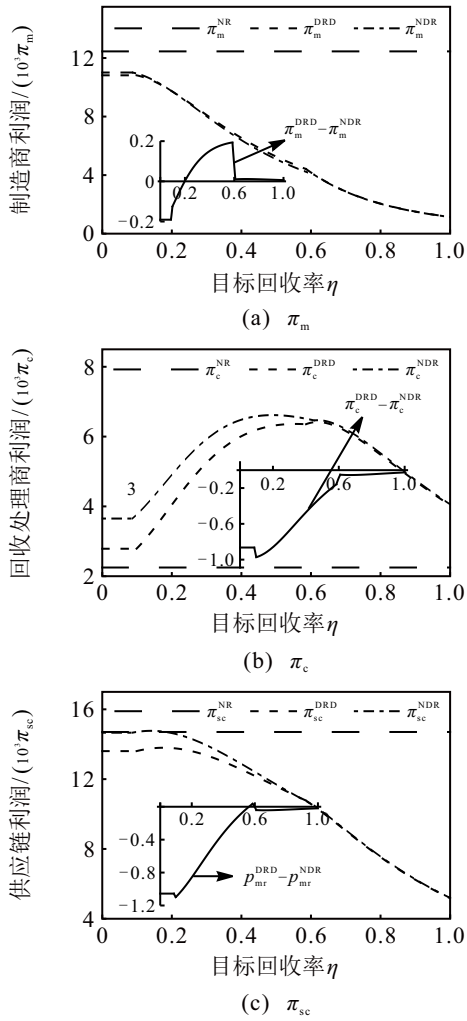


图 5　目标回收率η对不同模型下供应链及成员利润的影响

销量的持续下降将显著压缩制造商利润空间, 为弥补由销量下降带来的利润损失, 制造商的回收定价策略将发生调整, 即转而降低电子废弃物的回收价格以提高回收环节的利润. 对回收处理商而言, 目标回收率的提高将加剧其在回收市场中的不利处境, 其电子废弃物回收价格均随目标回收率的上升而下降.

由图 4(b) 可知, 在 DRD 和 NDR 模型下, 电子废弃物的回收总量随着目标回收率的增加呈现出先增加后减少的变化趋势. 这是因为在目标回收率较低时, 制造商主要通过增加电子废弃物的回收价格来提高回收量从而达成回收目标. 尽管回收竞争会挤压回收处理商的回收规模, 但制造商回收量增加的幅度大于回收处理商回收量减少的幅度, 从而总回收量上升. 然而, 随着目标回收率进一步提高, 制造商逐渐转向通过压缩新产品销售规模来降低所需履行的目标回收量, 其自身的回收规模也随之下降, 进而导致电子废弃物的总回收量反而减少. 由图 4(c) 可知, 在 DRD 模型和 NDR 模型下, 随着目标回收率的提高, 对环境的影响总体呈下降趋势, 表明严格的回收目标责任制在一定程度上有助于减轻环境负担. 由图 5 可知, 随着目标回收率的不断增加, 制造商利润和供应链整体利润呈现下降趋势, 而回收处理商的利润则先增加后减少. 这表明回收目标责任制的实施虽然有助于提升环境绩效, 但会损害供应链和制造商的利润.

3.2　不同模型均衡解及利润对比分析

下面对不同模型下的均衡解及供应链整体与成员利润进行对比分析.

由图 3 和图 4 可知, 与不实施回收规制政策 (NR 模型) 相比, 在实施回收目标责任制与消费者押金返还制度下 (即 DRD 模型和 NDR 模型), 回收处理商制定的回收价格整体较低; 当目标回收率不处于较低水平时 (见图中$\eta > 0.2$区域), 新产品销售价格显著高于 NR 模型; 此外, 当目标回收率处于适中区间 (见图中$0.16 < \eta < 0.84$区域) 时, 制造商的回收价格也会高于 NR 模型. 上述价格决策共同作用, 使得 DRD 模型和 NDR 模型下的新产品销售量始终

低于 NR 模型. 由于回收规制政策的实施强化了回收激励, 在目标回收率不是特别高时 (见图中 $\eta < 0.76$区域), DRD 模型和 NDR 模型下的电子废弃物总回收量高于 NR 模型. 然而, 随着目标回收率的持续增加, 新产品销量的不断下降逐渐对回收规模形成约束, 导致 DRD 模型和 NDR 模型下的电子废弃物回收总量反而低于 NR 模型. 从环境影响的角度来看, 无论目标回收率取何水平, 政府实施回收规制政策时的环境负面影响均显著低于未实施回收规制的情形, 即回收目标责任制与押金返还制度在环境治理层面具有持续且稳定的正向效应.

结合图 5 可以发现, 与不实施回收规制政策 (NR 模型) 相比, 在实施回收目标责任制与消费者押金返还制度的情形下 (即 DRD 模型和 NDR 模型), 供应链整体利润及制造商的利润都会更低, 但回收处理商利润会更高. 此外, NDR 模型下供应链整体利润和回收处理商利润始终高于 DRD 模型. 然而, 从环境绩效的角度看, 在目标回收率的大部分可行区间内, NDR 模型所带来的环境负面影响高于 DRD 模型, 但当目标回收率处于中等水平时 (见图中$0.3 < \eta < 0.6$区域), 电子废弃物的回收量达到峰值, 此时 NDR 模型的环境负面影响反而低于 DRD 模型. 上述结果表明, 回收规制政策的实施总体上有助于改善环境绩效, 但是往往会损害供应链整体和制造商的利润. 为实现环境目标与经济绩效之间的平衡, 政府可以通过合理设定目标回收率, 并将未赎回押金用于对制造商和回收处理商的补贴, 在提升供应链整体利润和回收处理商利润的同时降低对环境的负面影响. 尽管该补贴机制在一定程度上仍可能压缩制造商的利润空间, 但通过合理调整制造商与回收处理商之间的补贴分配比例, 可有效缓解这一不利影响. 进一步考虑消费者押金水平变化对模型结果的影响, 发现前述结论仍然成立.

4 结论与展望

本文研究了由制造商和回收处理商组成的闭环供应链, 探讨了在无回收规制、双重回收规制以及双重回收规制且将未赎回押金补贴等三种情形下, 制造商与回收处理商的价格决策均衡解, 并对比分析了两种组合回收规制政策对促进电子废物回收和改善环境绩效的效果. 主要研究结论如下:

(1) 若政府仅实施单一的回收目标责任制时, 只有在目标回收率被设定为较高水平的情况下, 制造商和回收商才会对电子废弃物采取全部回收策略, 即回收目标责任制存在一定的有效边界. 相比之下, 当政府实施回收目标责任制并引入消费者押金返还制度时, 只要匹配适当的押金水平, 无论目标回收率取何值, 均能够实现电子废弃物的全部回收, 适当押金水平能够降低系统对高目标回收率的依赖, 扩大全部回收策略的实现区间.

(2) 在双重回收规制情形下, 消费者押金返还制度不仅影响消费者返还行为, 也会通过改变正规回收收益结构影响制造商和回收处理商的定价与回收策略, 使回收规制从企业端单边约束转向消费者端激励与企业端责任共同作用. 此时, 提高目标回收率或者增加消费者押金水平能够促使制造商和回收处理商对电子废弃物的回收策略从部分回收转向全部回收.

(3) 从环境影响的角度来看, 无论目标回收率取何水平, 政府实施回收规制政策时生产回收等活动对环境的负面影响均显著低于未实施回收规制的情形, 即回收目标责任制与押金返还制度在环境治理层面具有正向效应, 且随着目标回收率或者押金水平的提高, 环境负面影响会呈现持续下降趋势.

(4) 从供应链绩效的角度来看, 回收目标责任制与消费者押金返还制度的实施总是会损害供应链整体利润与制造商利润, 且随着目标回收率或者押金水平的提高, 供应链整体利润及制造商利润均呈现持续下降趋势.

(5) 在双重回收规制情形下, 若将未赎回押金用于对制造商和回收处理商的补贴, 随着对制造商补贴比例的增加, 新产品销量和电子废弃物回收量都会增加, 但同时也可能会加剧对环境的负面影响.

(6) 在双重回收规制且将未赎回押金补贴的情形下, 供应链整体利润和回收处理商利润始终高于不补贴情形; 且在目标回收率的大部分可行区间内, 其环境负面影响也高于不补贴情形, 但当目标回收率处于一定区间时, 补贴机制反而能够带来更低的环境负面影响. 为实现环境目标与经济绩效之间的平衡, 政府可以通过合理设定目标回收率, 并将未赎回押金用于对制造商和回收处理商的补贴, 在提升供应链整体利润和回收处理商利润的同时降低对环境的负面影响.

尽管本文得出了一些有意义的结论, 但仍存在一定的研究局限. 首先, 本文假设新产品销量与电子废弃物回收量由销售价格和回收价格决定, 而在现实情境中, 二者还可能受到随机因素的影响, 未来可进一步进行深入研究. 其次, 本文未考虑消费者押金返还制度在实施过程中给制造商带来的押金收取与管理成本, 后续研究可对该成本因素进行拓展. 最后,

本文对环境影响的度量主要基于新产品销量和电子废弃物回收量, 尚未对不同政策组合下的实际环境效益进行量化刻画, 如碳排放减排或资源节约效应等, 相关问题有待未来进一步深入研究.

参考文献 (References)

[1] Shimada T, Van Wassenhove L N. Closed-loop supply chain activities in Japanese home appliance/personal computer manufacturers: A case study[J]. International Journal of Production Economics, 2019, 212: 259-265.

[2] Diabat A, Jebali A. Multi-product and multi-period closed loop supply chain network design under take-back legislation[J]. International Journal of Production Economics, 2021, 231: 107879.

[3] 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.)

[4] Liu Z, Li K W, Tang J, et al. Optimal operations of a closed-loop supply chain under a dual regulation[J]. International Journal of Production Economics, 2021, 233: 107991.

[5] 王麒翔, 李帮义, 陈白雪, 等. 回收目标责任制下制造商与零售商的再制造策略研究[J]. 系统工程理论与实践, 2023, 43(8): 2352-2365.
(Wang Q X, Li B Y, Chen B X, et al. Research on remanufacturing strategies of the manufacturer and the retailer under collection target responsibility system[J]. Systems Engineering — Theory & Practice, 2023, 43(8): 2352-2365.)

[6] Li J J, Wang Z X, Li H, et al. Which policy can effectively promote the formal recycling of power batteries in China?[J]. Energy, 2024, 299: 131445.

[7] Yu J L, Williams E, Ju M T, et al. Managing e-waste in China: Policies, pilot projects and alternative approaches[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2010, 54(11): 991-999.

[8] Wang Q X, Li B Y, Chen B X, et al. Impact of product design on remanufacturing under environmental legislation[J]. Computers & Industrial Engineering, 2022, 165: 107889.

[9] Chen W Y, Kucukyazici B, Saenz M J. On the joint dynamics of the economic and environmental performances for collective take-back systems[J]. International Journal of Production Economics, 2019, 218: 228-244.

[10] Mazahir S, Verter V, Boyaci T, et al. Did Europe move in the right direction on E-waste legislation?[J]. Production and Operations Management, 2019, 28(1): 121-139.

[11] Esenduran G, Kemahlıoğlu-Ziya E, Swaminathan J M. Take-back legislation: Consequences for remanufacturing and environment[J]. Decision Sciences, 2016, 47(2): 219-256.

[12] Xu J, Luo C L, Ng C T, et al. Remanufacturing with random yield in the presence of the take-back regulation[J]. Computers & Industrial Engineering, 2022, 168: 108097.

[13] Hammond D, Beullens P. Closed-loop supply chain network equilibrium under legislation[J]. European Journal of Operational Research, 2007, 183(2): 895-908.

[14] 王竟竟, 许民利. 回收目标责任制下闭环供应链的定价及以旧换新策略研究[J]. 中国管理科学, 2024, 32(11): 298-311.
(Wang J J, Xu M L. Pricing and trade-in strategy of closed-loop supply chain under the recycling target responsibility system[J]. Chinese Journal of Management Science, 2024, 32(11): 298-311.)

[15] Chen Y Y, Li B Y, Zhang G Q, et al. Quantity and collection decisions of the remanufacturing enterprise under both the take-back and carbon emission capacity regulations[J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2020, 141: 102032.

[16] Linderhof V, Oosterhuis F H, Van Beukering P J H, et al. Effectiveness of deposit-refund systems for household waste in the Netherlands: Applying a partial equilibrium model[J]. Journal of Environmental Management, 2019, 232: 842-850.

[17] Palmer K, Walls M. Optimal policies for solid waste disposal Taxes, subsidies, and standards[J]. Journal of Public Economics, 1997, 65(2): 193-205.

[18] Wojanowski R, Verter V, Boyaci T. Retail-collection network design under deposit-refund[J]. Computers & Operations Research, 2007, 34(2): 324-345.

[19] Kulshreshtha P, Sarangi S. “No return, no refund”: An analysis of deposit-refund systems[J]. Journal of Economic Behavior & Organization, 2001, 46(4): 379-394.

[20] 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.)

[21] 黄春香, 李登峰. 基于非合作-合作两型博弈且押金返还回收商的闭环供应链定价与利润分配研究[J]. 中国管理科学, 2024, 32(2): 166-177.
(Huang C X, Li D F. Research on closed-loop supply chain pricing and profit distribution based on noncooperative-cooperative biform game and deposit return to recyclers[J]. Chinese Journal of Management Science, 2024, 32(2): 166-177.)

[22] 李登峰, 魏骊晓, 李梦祺. 押金返还制造商的闭环供应链双渠道回收竞争与利润分配的非合作-合作两型博弈方法[J]. 系统工程理论与实践, 2023, 43(11): 3241-3261.
(Li D F, Wei L X, Li M Q. Noncooperative-cooperative

biform game approach for dual channel recycling competition and profit allocation of closed-loop supply chain under deposit return to manufacturer[J]. Systems Engineering — Theory & Practice, 2023, 43(11): 3241-3261.)

[23] Esenduran G, Atasu A, Van Wassenhove L N. Valuable e-waste: Implications for extended producer responsibility[J]. IISE Transactions, 2019, 51(4): 382-396.

[24] 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[J]. 中国管理科学, 2018, 26(1): 118-127.
(Feng Z W, Xiao T J, Chai C C. Recycling and pricing strategies of closed-loop supply chain by the leader of third-party recycler[J]. Chinese Journal of Management Science, 2018, 26(1): 118-127.)

[25] Zheng B R, Yang C, Yang J, et al. Dual-channel closed loop supply chains: Forward channel competition, power structures and coordination[J]. International Journal of Production Research, 2017, 55(12): 3510-3527.

[26] 赵道致, 杨爽, 韩红帅, 等. 考虑低碳商誉的产能需求方绿色转型策略[J]. 控制与决策, 2025, 40(11): 3363-3372.
(Zhao D Z, Yang S, Han H S, et al. Green transformation strategies for green manufacturing capacity demanders with low-carbon goodwill consideration[J]. Control and Decision, 2025, 40(11): 3363-3372.)

[27] Li X, Du J B, Liu P, et al. Optimal choice of power battery joint recycling strategy for electric vehicle manufacturers under a deposit-refund system[J]. International Journal of Production Research, 2023, 61(21): 7281-7301.

[28] Gong Y D, Chen M Z, Wang Z, et al. With or without deposit-refund system for a network platform-led electronic closed-loop supply chain[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 281: 125356.

[29] Guo X L, Li X S, Bian J S, et al. Deposit or reward: Express packaging recycling for online retailing platforms[J]. Omega, 2023, 117: 102828.

[30] 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.)

作者简介

王竟竟 (1987−), 女, 副教授, 博士生, 主要研究方向为供应链管理、行为运作管理, E-mail: wjj_xqc@163.com;

马淑姣 (1990−), 女, 副教授, 博士生, 主要研究方向为供应链金融、资源与环境管理, E-mail: msj3132@126.com;

杨鹏 (1980−), 男, 教授, 博士生, 主要研究方向为物流与供应链管理、管理决策优化, E-mail: yangpeng@hufe.edu.cn.