

快递包装混合回收闭环供应链决策与协调

郑克俊, 翟小可, 李锦莹

(广东科学技术职业学院商学院, 广东 珠海 519090)

摘要: **目的** 优化协调快递包装回收闭环供应链参与者的利益, 促使提高废旧包装物回收率。 **方法** 运用博弈论方法, 构建由快递包装生产商、快递公司、互联网回收平台和消费者组成的闭环供应链模型, 计算和比较在分散决策和集中决策时的利润, 引入收益共享契约进行协调。 **结果** 集中决策显著优于分散决策; 协调后参与者的利润比协调前的有所提高, 利润提高的幅度取决于协调比例大小, 数值算例验证了该结果。 **结论** 收益共享契约协调机制能够提高供应链系统利润, 激发参与者积极回收快递包装, 减轻对环境的污染, 实现企业、消费者和社会共赢。建议政府积极推广“互联网+”的混合回收。

关键词: 快递包装; 混合回收; 决策与协调; 互联网+; 闭环供应链

中图分类号: F272 文献标识码: A 文章编号: 1001-3563(2022)21-0224-08

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2022.21.029

Decision-making and Coordination of Closed-loop Supply Chain for Mixed Recycling of Express Packages

ZHENG Ke-jun, ZHAI Xiao-ke, LI Jin-ying

(Business School, Guangdong Vocational Institute of Science and Technology, Guangdong Zhuhai 519090, China)

ABSTRACT: The work aims to optimize and coordinate the interests of participants in the closed-loop supply chain of express packaging recycling and promote the improvement of the recycling rate of packaging wastes. Based on the method of game theory, a closed-loop supply chain model composed of express packaging manufacturers, express companies, Internet recycling platforms and consumers was constructed, the profits in decentralized decision-making and centralized decision-making were calculated and compared, and the revenue sharing contract for coordination was introduced. The results showed that centralized decision-making was significantly better than decentralized decision-making. The profit of participants after coordination was higher than that before coordination, and the range of profit increase depended on the coordination proportion. A numerical example verified the results. The following conclusion is made that the revenue-sharing contract coordination mechanism can improve the profits of the supply chain system, stimulate participants to actively recycle express packaging, reduce environmental pollution, and achieve a win-win situation for enterprises, consumers and society. The government is recommended to actively promote "Internet+" mixed recycling.

KEY WORDS: express packaging; mixed recycling; decision-making and coordination; internet +; closed-loop supply chain

国家邮政局公布, 2021年全国快递寄递量1.085亿件, 创收1.04万亿元, 与2020年相比, 分别增长

了30%和18%。为了治理快递业务迅猛增长所造成的污染, 国家开展了快递包装污染专项治理。2021年

收稿日期: 2022-01-24

基金项目: 广东省教育厅重大科研项目(2017GWZDXM002); 广东省科技创新战略专项资金“攀登计划”项目(pdjh2020a0964); 广东省教育厅青年创新人才项目(2018GWQNCX039)

作者简介: 郑克俊(1968—), 男, 硕士, 教授, 主要研究方向为物流与供应链。

新增废旧快递包装回收网点 3.6 万个, 可循环快递箱使用量 630 万个, 电商快件不需要二次包装的占比已达 80.5%。然而, 快递包装废弃物造成的环境压力依然不可小觑。2020 年全国已处置包装废弃物大约 1 500 万吨^[1], 预计 2025 年将产出 4 127.05 万吨。降低快递包装污染迫在眉睫。

为了实现我国快递包装的减量化、循环再利用和绿色化的治理目标, 国家发布了《关于协同推进快递业绿色包装工作的指导意见》和《关于加快推进快递包装绿色转型的意见》等政策文件, 鼓励社会各界开展各种形式的快递包装绿色化转型与治理。在国家政策推动下, 快递公司和互联网回收平台纷纷开展了回收再利用的有益尝试^[2-3]。京东、菜鸟、苏宁分别推出“青流箱”、“回箱计划”和“共享快递盒”等循环使用快递包装的行动计划, 互联网回收平台推出“爱回收”^[3]、“纸壳别跑”、“收纸拉”^[4] 等品牌的包装回收业务。国内外学者^[5-11]也纷纷建言献策, 提出了各种各样的促进快递包装物循环利用、减量化与绿色化的策略。

针对包装“互联网+”回收形式, 国内外学者展开了深入研讨。公彦德等^[12]按回收物流外包和回收物流自营 2 种模式来分别探讨快递包装的回收决策问题, 何波等^[13]研究了以物流企业独立主导回收和以互联网电商平台独立主导回收这 2 种回收模式下的快递包装回收策略。在实践中, 显然存在快递公司和互联网平台同时参与回收的混合回收模式。梁喜等^[14]研究了混合回收模式下的闭环供应链决策机制, 虽然是以废旧家电为样本, 但仍然能为快递包装的混合回收模式下的决策提供参考。许民利等^[15]运用博弈论探讨了废旧产品的回收定价策略, 得出“互联网+”回收将形成规模化市场的结论, 这意味着快递包装的“互联网+”回收存在巨大市场空间, 快递包装回收大有可为。政府的奖惩机制对快递包装回收决策的影响是研究的热点。如欧阳恋群等^[16]、何海龙等^[17]研究了环境税费、政府补贴、奖惩力度及消费者满意度等因素对互联网电商企业快递包装实施回收的影响。一些研究^[8-11]甚至直接将政府的奖惩作为影响快递包装回收的决策变量, 特别强调了政府的作用。政府、企业和消费者各自的行为决定了快递包装回收的效果和水平。在参与快递包装回收的角色定位中, 企业和消费者是直接参与者, 政府是间接参与者, 因此, 偏向认为快递包装回收供应链参与者是企业 and 消费者, 而将政府作为一个影响供应链的外因变量来展开研究更切合实际。

文中研究快递包装生产商、快递公司、互联网回收平台和消费者构成的闭环供应链, 拟运用博弈论方法, 探讨在不同管控方式下供应链的利润水平, 并采用收益共享-成本共担(简称收益共享)契约协调供应链参与者的利益, 希望找出参与者的最

优决策, 为快递包装回收供应链的参与者制定回收策略提供决策支持, 为政府提供政策建议。

1 建模

1.1 模型概述

“互联网+”回收具有信息处理能力强、价格透明、服务便捷、市场潜力巨大等优势, 因此文中引入互联网回收平台开展回收业务。快递包装生产商、快递公司、互联网回收平台和消费者共同组成闭环供应链, 政府作为外因变量, 通过税收-补贴这一最佳调控机制^[5]对供应链产生影响。在正向物流中, 包装生产商将生产的快递包装物批发给快递公司, 伴随电商业务, 快递公司可将包装物销售给消费者。在逆向物流中, 快递公司通过快递网点回收消费者返还的废旧包装物, 互联网回收平台接收消费者网上订单来回收废旧包装物。快递公司与互联网回收平台各自将回收的废旧包装物销售给包装生产企业, 包装生产企业利用回收的废旧包装物再生产出新的快递包装物(图 1)。

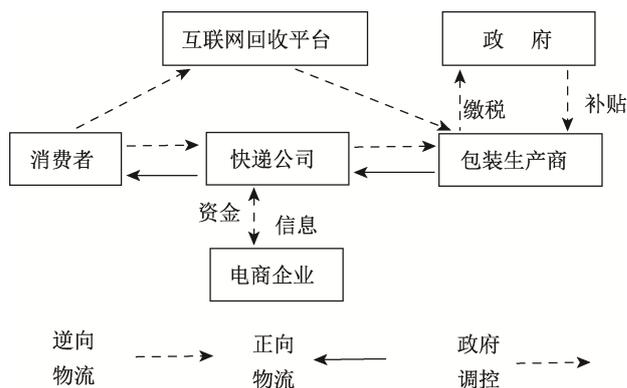


图 1 快递包装混合回收闭环供应链
Fig.1 Closed loop supply chain of mixed recycling for express packages

1.2 模型假设

1) 假设所有可重复使用的快递包装容器都是纸箱。由于纸箱生产商通过回收再制造生产出的纸箱与采用原材料生产出的纸箱功能一样、质量基本无差异, 因此假设生产出的纸箱销售价格是一样的。又由于纸箱单位处置成本较低, 且回收的大部分纸箱都流向纸箱生产企业, 因此不考虑纸箱的废弃处置成本。

2) 假设快递公司回收与互联网平台回收不存在竞争关系, 闭环供应链中各参与者处于均等地位, 信息对称, 风险中性。

3) 参考文献^[13], 假设纸箱的市场需求量为 Q 件, 其中 $Q=Q_0-\omega P$ (Q_0 为纸箱市场最大需求量, ω 为纸箱回收价格敏感系数^[13,18], $\omega \in [1, 1\ 000]$, P 为纸箱回收价格(元/件)。纸箱的需求量等于市场最大

需求量减去回收再利用量。回收再利用量受回收价格和价格敏感系数影响。

4) 参考文献[12], 假设纸箱回收量 X (单位: 件) 与回收价格 P 呈线性关系, $X_i = \lambda MP_i$ 。其中, λ 表示消费者对回收价格的敏感程度^[12,19], $\lambda \in [0,1]$, M 表示纸箱回收市场规模, 单位为件。下标 $i \in \{1,2,3\}$, 1—3 分别代表纸箱生产商、快递公司和互联网回收平台。

5) 其他符号描述。纸箱批发价为 P_{11} (元/件), 纸箱生产商给互联网回收平台的回收转移价格为 P_{12} (元/件), 纸箱边际生产和边际再生产成本分别为 c_1 (元/件) 和 v_1 (元/件), 互联网回收平台的回收价格和单位运营成本分别是 P_3 (元/件) 和 c_3 (元/件), 政府给纸箱生产商的单位补贴和向其征收的单位环境税额分别是 a (元/件) 和 b_1 (元/件), 纸箱回收率为 φ (%), 纸箱生产商、快递公司和互联网回收平台的利润分别是 Π_1 、 Π_2 和 Π_3 (元)。

2 分散决策

2.1 利润函数

根据图 1 模型及上述假设, 计算出纸箱生产商、快递公司、互联网回收平台的利润函数分别为:

$$\Pi_1 = (P_{11} - c_1)(Q - X_1) + (P_{11} - v_1 - P_{12} + a) \cdot X_1 - b_1(Q - X_1) \quad (1)$$

式中: 第 1 项为采用原材料制造新纸箱获得的利润; 第 2 项表示回收再制造纸箱所获利润; 第 3 项表示政府对未回收纸箱征收的环境税费。

$$\Pi_2 = (P - P_{11})Q + (P_{12} - P_2 - c_2)X_2 \quad (2)$$

式中: 第 1 项为快递公司将纸箱批发给互联网回收平台所获的利润; 第 2 项表示快递公司回收废旧纸箱所获利润。

$$\Pi_3 = [P_{12} - (P_3 + c_3)]X_3 \quad (3)$$

式中: $P_{12}X_3$ 为互联网回收平台将可再制造的废旧纸箱卖给制造商获得的收益; $(P_3 + c_3)X_3$ 为互联网平台回收费用及运营成本。

2.2 Stackelberg 博弈

博弈论 (Game Theory) 是研究在特定条件下, 决策者依据拥有的信息, 各自从备选方案中选择最优方案、采取行动, 从而获得收益的理论。博弈的最终目标是实现各参与方利益最大化的均衡。

Stackelberg 博弈是一个动态博弈, 在博弈中, 各参与方依据先后顺序做决策。其中领导者为先做出决策的优势方, 跟随者为劣势方。领导者的决策除了考虑自身收益外, 还会预判跟随者的反应; 而跟随者在领导者决策基础上, 选择对自己最有利的方案。决策者之间是相互制约、相互影响的关系。

文中所研究的是完全信息下的动态博弈, 制造

商为领导者, 快递公司和互联网回收平台为跟随者, 他们之间构成 Stackelberg 博弈。

2.3 博弈均衡时的最优解

结论 1: 分散决策时, 供应链参与者博弈均衡时的最优解为:

$$P_{11}^* = \frac{Q_0 + \omega(c_1 + b_1)}{2\omega} \quad (4)$$

$$P_{12}^* = \frac{(c_2 + c_3) + 2(c_1 - v_1 + a + b_1)}{4} \quad (5)$$

$$P^* = \frac{3Q_0 + \omega(c_1 + b_1)}{4\omega} \quad (6)$$

$$P_2^* = \frac{(c_3 - 3c_2) + 2(c_1 - v_1 + a + b_1)}{8} \quad (7)$$

$$P_3^* = \frac{(c_2 - 3c_3) + 2(c_1 - v_1 + a + b_1)}{8} \quad (8)$$

上标*表示最优值。

证明: 供应链的参与者形成 Stackelberg 博弈, 用逆向求解法求解。

将 $X_3 = \lambda MP_3$ 代入 (3) 式, 并分别求 Π_3 关于 P_3 的一阶、二阶偏导数, 得:

$$\frac{\partial \Pi_3}{\partial P_3} = \lambda M(P_{12} - 2P_3 - C_3), \text{ 因为 } \frac{\partial^2 \Pi_3}{\partial P_3^2} = -2\lambda M <$$

0, 所以 Π_3 存在最优值, 令 $\frac{\partial \Pi_3}{\partial P_3} = 0$, 得:

$$P_3^* = \frac{P_{12} - c_3}{2} \quad (9)$$

利用海赛矩阵 (Hessian Matrix) 来判定多元函数的极值是求解最优化问题的常用方法。判定依据是: 如果海赛矩阵正定, 则存在局部极小值; 如果负定, 则存在局部极大值。海赛矩阵是正定、负定或不定, 一般采用矩阵的顺序主子式来判定。如果矩阵的各阶顺序主子式都为正, 则为正定; 如果奇数阶顺序主子式为负, 偶数阶顺序主子式为正, 则为负定; 如果上述两个条件都不满足, 则为不定。

Π_2 关于 P 和 P_2 的海赛矩阵为 $H_2 = \begin{bmatrix} -2\omega & 0 \\ 0 & -2\lambda M \end{bmatrix}$, 易判断 H_2 为负定, 因此 P 和 P_2 存在唯一最优解。联立 $\frac{\partial \Pi_2}{\partial P} = 0$ 和 $\frac{\partial \Pi_2}{\partial P_2} = 0$, 解得:

$$P^* = \frac{Q_0 + \omega P_{11}}{2\omega} \quad (10)$$

$$P_2^* = \frac{P_{12} - c_2}{2} \quad (11)$$

将式 (9) — (11) 代入式 (1) 整理化简, 计算出 Π_1 关于 P_{11} 和 P_{12} 的海赛矩阵为 $H_1 = \begin{bmatrix} -\omega & 0 \\ 0 & -2\lambda M \end{bmatrix}$, 易判断 H_1 负定, 因此 P_{11} 和 P_{12}

有唯一最优解。联立 $\frac{\partial \Pi_1}{\partial P_{11}} = 0$ 和 $\frac{\partial \Pi_1}{\partial P_{12}} = 0$, 求解得:

$$P_{11}^* = \frac{Q_0 + \omega(c_1 + b_1)}{2\omega} \quad (12)$$

$$P_{12}^* = \frac{(c_2 + c_3) + 2(c_1 - v_1 + a + b_1)}{4} \quad (13)$$

$$\Pi_1^* = \frac{2[Q_0 - \omega(c_1 + b_1)][Q_0 - \omega(c_1 + b_1) - \lambda M(2c_1 - 2v_1 + 2a + 2b_1 - c_2 - c_3)]}{16\omega} + \frac{\lambda M(2c_1 - 2v_1 + 2a + 2b_1 - c_2 - c_3)[2Q_0 + \omega(2a - 2v_1 - c_2 - c_3)]}{16\omega} \quad (14)$$

$$\Pi_2^* = \frac{\lambda M \omega(2c_1 - 2v_1 + c_3 - 3c_2 + 2a + 2b_1)^2 + 4(Q_0 - \omega c_1 - \omega b_1)^2}{64\omega} \quad (15)$$

$$\Pi_3^* = \frac{\lambda M(2c_1 - 2v_1 + c_2 - 3c_3 + 2a + 2b_1)^2}{64} \quad (16)$$

$$\Pi^* = \frac{3\lambda M(c_1 - v_1)(c_1 - v_1 - c_2 - c_3)}{8} + \frac{3\lambda M(a + b_1)(2c_1 - 2v_1 - c_2 - c_3 + a + b_1)}{8} + \frac{\lambda M(7c_2^2 + 7c_3^2 - 2c_2c_3)}{32} + \frac{3[Q_0 - \omega(c_1 + b_1)]^2}{16\omega} \quad (17)$$

回收率为式 (18) :

$$\phi^* = \frac{\lambda M(2c_1 - 2v_1 + c_2 - c_3 + 2a + 2b_1)}{Q_0 - \omega(c_1 + b_1)} \quad (18)$$

3 集中决策

3.1 集中决策均衡解

集中决策时供应链系统的利润为制造商、快递公司和互联网回收平台的利润之和, 表示为:

$$\Pi = (P - c_1)(Q - X) + (P - P_3 - c_3 - v_1)X_3 + (P - P_2 - c_2 - v_1)X_2 - b_1(Q - X) + aX \quad (19)$$

结论 2: 集中决策时, 供应链参与者博弈均衡时的最优解为:

$$P^\Delta = \frac{Q_0 + \omega(c_1 + b_1)}{2\omega} \quad (20)$$

$$P_2^\Delta = \frac{c_1 - v_1 - c_2 + a + b_1}{2} \quad (21)$$

$$P_3^\Delta = \frac{c_1 - v_1 - c_3 + a + b_1}{2} \quad (22)$$

上标 Δ 表示集中决策时最优值。

证明:

供应链的利润函数 Π 关于 P 、 P_2 和 P_3 的海赛矩阵

$$\text{为 } \mathbf{H}_1 = \begin{bmatrix} -2\omega & 0 & 0 \\ 0 & -2\lambda M & 0 \\ 0 & 0 & -2\lambda M \end{bmatrix}, \text{ 易判断 } \mathbf{H}_1 \text{ 负定, 因此}$$

P 、 P_2 和 P_3 存在唯一最优解。联立 $\frac{\partial \Pi}{\partial P} = 0$ 、 $\frac{\partial \Pi}{\partial P_2} = 0$

和 $\frac{\partial \Pi}{\partial P_3} = 0$, 求得均衡时的最优解, 列式 (20) — (22)

将式 (12) — (13) 代入式 (9) — (11), 化简整理可得式 (4) — (8), 即结论 1 的均衡解。证毕。

2.4 最优利润

根据最优解, 计算出纸箱生产商、快递公司和互联网回收平台的最优利润分别见式 (14) — (16)。

当均衡时, 供应链的总利润为式 (17) :

所示。证毕。

3.2 集中决策时供应链的最优利润

将式 (20) — (22) 代入 (19) 式, 计算出最优利润, 列式 (23)。

$$\Pi^\Delta = \frac{\lambda M(c_1 - v_1)(c_1 - v_1 - c_2 - c_3)}{2} + \frac{\lambda M(a + b_1)(2c_1 - 2v_1 - c_2 - c_3 + a + b_1)}{2} + \frac{\lambda M(c_2^2 + c_3^2)}{4} + \frac{[Q_0 - \omega(c_1 + b_1)]^2}{4\omega} \quad (23)$$

3.3 集中决策与分散决策对比

结论 3: 集中决策时的销售价低于分散决策时的销售价。

证明: 根据式 (6) 和 (20) 作差计算得:

$$P^\Delta - P^* = \frac{\omega(c_1 + b_1) - Q_0}{4\omega} < 0, \text{ 可得 } P^\Delta < P^*. \text{ 证毕。}$$

结论 4: 集中决策时的回收价高于分散决策时的回收价。

证明: 根据式 (7) 和 (21) 作差计算得:

$$P_2^\Delta - P_2^* = \frac{2c_1 - 2v_1 - c_2 - c_3 + 2a + 2b_1}{8}$$

由 $P_2^\Delta > 0$, 从式 (21) 可得 $c_1 - v_1 - c_2 + a + b_1 > 0$,

由 $P_2^* > 0$, 从式 (7) 可得 $c_1 - v_1 - c_3 + a + b_1 > 0$,

上述两式相加可得 $2c_1 - 2v_1 - c_2 - c_3 + 2a + 2b_1 > 0$,

从而 $P_2^\Delta > P_2^*$ 。同理可证 $P_3^\Delta > P_3^*$ 。证毕。

结论 5: 集中决策的效果好于分散决策。

证明: 这里以供应链系统的利润作为评价的依据, 利润高的比利润低的效果好。

根据式 (17) 和 (23) 作差计算得:

$$\begin{aligned} \Pi^{\Delta} - \Pi^* = & \frac{\lambda M(c_1 - v_1 + a + b_1)(c_1 - v_1 + a + b_1 - c_2 - c_3)}{8} + \quad (24) \\ & \frac{\lambda M(c_2^2 + c_3^2)}{32} + \frac{[Q_0 - \omega(c_1 + b_1)]^2}{16} \end{aligned}$$

在 (24) 式中, 第 2、3 项均大于 0, 第 1 项中, 分子 $c_1 - v_1 + a + b_1 > 0$ 。

在式 (8) 中, 由 $P_3^* > 0$, 可得 $(c_3 - 3c_2) + 2(c_1 - v_1 + a + b_1) > 0$

在式 (7) 中, 由 $P_2^* > 0$, 可得 $(c_2 - 3c_3) + 2(c_1 - v_1 + a + b_1) > 0$

将上述两式相加可得 $c_1 - v_1 + a + b_1 - c_2 - c_3 > 0$, 从而可得 (24) 式第 1 项也大于 0。

所以, $\Pi^{\Delta} - \Pi^* > 0$, 即 $\Pi^{\Delta} > \Pi^*$ 。证毕。

结论 5 说明, 集中决策削减了供应链的“双重边际化”, 实现了供应链参与者共赢的目标。

4 契约协调

4.1 契约协调后的利润函数

根据《关于推进电子商务与快递物流协同发展的意见》中提出的“建立和完善快递包装生产者责任延伸制”文件精神, 快递包装生产商应承担部分废旧包装回收的成本, 并从快递包装件销售收入中取得相应的补偿, 因此, 这里采用收益共享契约协调机制来协调供应链系统中参与者的利益。假设快递包装生产商按比例 k_1 承担快递公司的回收成本并享受相应的销售收益, 按比例 k_2 承担互联网回收平台的回收成本, $k_1, k_2 \in (0, 1)$ 。

契约协调后, 快递包装生产商、快递公司和互联网回收平台的利润函数分别为

$$\begin{aligned} \Pi_1 = & k_1QP - k_1(P_2 + c_2)X_2 - \\ & k_2(P_3 + c_3)X_3 + (P_{11} - c_1)(Q - X) + \\ & (P_{11} - v_1 - P_{12} + a)X - b_1(Q - X) \quad (25) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Pi_2 = & (1 - k_1)QP - QP_{11} + P_{12}X_2 - \\ & (1 - k_1)(P_2 + c_2)X_2 \quad (26) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Pi_1^{\Omega} = & \frac{\lambda M}{4} \{ (c_1 - v_1 + a + b_1)[(3k_2 - k_1)(c_1 - v_1 + a + b_1) - 2k_2(c_2 + c_3)] + k_1c_2^2 + k_2c_3^2 \} + \\ & \frac{k_1[Q_0 - \omega(c_1 + b_1)]^2}{4\omega} \quad (36) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Pi_2^{\Omega} = & \frac{\lambda M}{4} (c_1 - v_1 - c_2 + a + b_1)[(1 + k_1 - 2k_2)(c_1 - v_1 + a + b_1) + (k_2 - 1)c_2] + \\ & \frac{(1 - k_1)[Q_0 - \omega(c_1 + b_1)]^2}{4\omega} \quad (37) \end{aligned}$$

$$\Pi_3^{\Omega} = \frac{\lambda M}{4} (1 - k_1)(c_1 - v_1 - c_2 + a + b_1)^2 \quad (38)$$

$$\Pi_3 = P_{12}X_3 - (1 - k_2)(P_3 + c_3)X_3 \quad (27)$$

4.2 契约协调后的最优解

以下用上标 Ω 表示使用契约协调后闭环供应链的最优解。

结论 6: 使用契约协调后供应链系统的最优解为

$$P^{\Omega} = \frac{\omega P_{11} + (1 - k_1)Q_0}{2\omega(1 - k_1)} \quad (28)$$

$$P_2^{\Omega} = \frac{P_{12} - (1 - k_1)c_2}{2(1 - k_1)} \quad (29)$$

$$P_3^{\Omega} = \frac{P_{12} - (1 - k_2)c_3}{2(1 - k_2)} \quad (30)$$

证明: 对式 (26) 分别求 Π_2 对变量 P 和 P_2 的一阶偏导数, 对式 (27) 求 Π_3 对变量 P_3 的一阶偏导数, 根

据最优化条件, 令 $\frac{\partial \Pi_2}{\partial P} = 0, \frac{\partial \Pi_2}{\partial P_2} = 0, \frac{\partial \Pi_3}{\partial P_3} = 0$, 联立求解, 可得系统最优解, 列式 (28) — (30)。证毕。

结论 7: 使用契约协调后, 供应链系统参与者达到博弈均衡需满足式 (31) — (32) 所示的条件。

$$P_{11}^{\Omega} = (1 - k_1)(c_1 + b_1) \quad (31)$$

$$P_{12}^{\Omega} = (1 - k_2)(c_1 - v_1 + a + b_1) \quad (32)$$

证明: 运用契约协调, 达到均衡时, 利润应达到集中决策时的水平, 需满足:

$$P^{\Omega} = P^{\Delta}, P_2^{\Omega} = P_2^{\Delta}, P_3^{\Omega} = P_3^{\Delta}, \text{即:}$$

$$\frac{\omega P_{11} + (1 - k_1)Q_0}{2\omega(1 - k_1)} = \frac{Q_0 + \omega(c_1 + b_1)}{2\omega} \quad (33)$$

$$\frac{P_{12} - (1 - k_1)c_2}{2(1 - k_1)} = \frac{c_1 - v_1 - c_2 + a + b_1}{2} \quad (34)$$

$$\frac{P_{12} - (1 - k_2)c_3}{2(1 - k_2)} = \frac{c_1 - v_1 - c_3 + a + b_1}{2} \quad (35)$$

联立 (33) — (35) 求解即可得出式 (31) — (32) 所示条件。证毕。

4.3 契约协调后的最优利润

分别将式 (28) — (32) 代入式 (25) — (27) 计算, 可得使用收益共享契约协调后参与者最优利润, 列式 (36) — (38) 所示。

契约协调后供应链系统的总利润列式 (39)。

6 结语

伴随我国快递业务量不断快速增长,采用一定的契约来协调快递包装回收参与者的利益,提高废旧快递包装回收率,对发展低碳绿色经济、实现碳达峰碳中和具有重要意义。在快递包装的“互联网+”混合回收闭环供应链系统中,集中决策的效果显著优于分散决策;收益共享契约不仅能协调参与者的个体利益,还能提高供应链的整体利润,激发参与者的回收积极性,因此,为了提高快递包装的循环利用水平,治理快递包装污染,政府应从集中决策角度统筹规划,加强对供应链的统一领导,让参与回收快递包装物的企业和消费者达成共识,统一行动。建议政府大力推广“互联网+”混合回收方式,通过实施税收-补贴监督激励机制和收益共享契约协调机制,来提高我国快递包装回收参与者的积极性,激励他们尽最大努力来提高快递包装回收量,解决快递包装物回收率低的问题,实现企业、消费者和社会共赢。

文中研究仅考虑一个快递包装生产商、一个快递公司和一个互联网回收平台组成的供应链,而未考虑多个参与者并存、多个参与者相互竞争等情形,另外供应链各参与者也可能存在信息不对称的问题。这些扰动因素均可能会对供应链的决策产生影响,这些都是未来进一步研究的方向。

参考文献:

- [1] 郑克俊,迟青梅,张惠娴. 快递包装的“互联网+”回收模式创新及实施策略[J]. 物流技术, 2020, 39(2): 15-19.
ZHENG Ke-jun, CHI Qing-mei, ZHANG Hui-xian. Strategy for Innovation and Implementation of “Internet+” Recycling of Express Packages[J]. Logistics Technology, 2020, 39(2): 15-19.
- [2] 郑克俊,迟青梅. 快递包装回收再利用的现状与问题[J]. 物流科技, 2019(12): 50-53.
ZHENG Ke-jun, CHI Qing-mei. Current Situation and Problems of Recycling and Reuse of Express Packaging[J]. Logistics Sci-Tech, 2019, 42(12): 50-53.
- [3] 郑克俊,张惠娴,曾华声. 快递包装回收与再利用的激励机制[J]. 中国资源综合利用, 2020, 38(6): 117-123.
ZHENG Ke-jun, ZHANG Hui-xian, ZENG Hua-sheng. Incentive Mechanism of Express Package Recycling and Reuse[J]. China Resources Comprehensive Utilization, 2020, 38(6): 117-123.
- [4] 刘佳玺. “互联网+”背景下快递包装闭环供应链决策与协调研究[D]. 西安: 长安大学, 2021: 16-34.
- [5] 颜波,李鸿媛,王滔,等. 考虑市场细分的零售商自主以旧换新策略研究[J]. 管理科学学报, 2017, 20(3): 119-135.
YAN Bo, LI Hong-yuan, WANG Tao, et al. Autonomous Trade-in Strategy for Retailer with Market Segmentation[J]. Journal of Management Sciences in China, 2017, 20(3): 119-135.
- [6] 田立平,李璐璐,李文龙. 基于专利保护下闭环供应链的快递包装回收定价研究[J]. 工业工程, 2020, 23(1): 81-86.
TIAN Li-ping, LI Lu-lu, LI Wen-long. A Study of Recycling Pricing for Express Packaging Based on Patent Protection Closed-Loop Supply Chain[J]. Industrial Engineering Journal, 2020, 23(1): 81-86.
- [7] 李正军,李恒. 政府管理下网络众包的快递包装回收模式创新[J]. 包装工程, 2018, 39(21): 133-138.
LI Zheng-jun, LI Heng. Innovation of Express Package Recovery Mode Based on Network Crowdsourcing under Government Management[J]. Packaging Engineering, 2018, 39(21): 133-138.
- [8] 胡鑫. 政府规制下快递包装回收策略[J]. 物流技术, 2021, 40(3): 91-96.
HU Xin. Express Package Recycling Strategy under Government Regulation[J]. Logistics Technology, 2021, 40(3): 91-96.
- [9] 胡觉亮,钱聪丽,韩曙光. 政府奖惩机制下的快递包装回收问题研究[J]. 浙江理工大学学报(社会科学版), 2019, 42(3): 223-231.
HU Jue-liang, QIAN Cong-li, HAN Shu-guang. Research on Express Packaging Recovery under the Government Reward-Punishment Mechanism[J]. Journal of Zhejiang Sci-Tech University, 2019, 42(3): 223-231.
- [10] 郑卫彦,孟燕萍. 政府引导下绿色逆向物流网络线性规划模型——以快递包装为例[J]. 华中师范大学学报(自然科学版), 2017, 51(4): 518-525.
ZHENG Wei-yan, MENG Yan-ping. The Linear Programming Model of the Green Reverse Logistics Network under the Guidance of the Government—Taking Express Packaging as an Example[J]. Journal of Central China Normal University (Natural Sciences), 2017, 51(4): 518-525.
- [11] 李璐璐,田立平,李东宁. 考虑差别定价和政府补贴的快递包装回收策略研究[J]. 生态经济, 2020, 36(9): 204-209.

- LI Lu-lu, TIAN Li-ping, LI Dong-ning. Research on the Recycling Strategy of Express Packaging under the Government Subsidies Based on Patent Protection and Differential Pricing[J]. *Ecological Economy*, 2020, 36(9): 204-209.
- [12] 公彦德, 王媛. 考虑拆解补贴分配的闭环供应链物流服务偏好研究[J]. *工业技术经济*, 2019, 38(3): 36-45.
- GONG Yan-de, WANG Yuan. Research on Logistics Service Preference of Closed-Loop Supply Chain Considering Distribution of Dismantling Subsidy[J]. *Journal of Industrial Technological Economics*, 2019, 38(3): 36-45.
- [13] 何波, 段雪苇. 可重复利用的快递包装回收模式研究[J]. *包装学报*, 2021, 13(5): 27-34.
- HE Bo, DUAN Xue-wei. Research on Recycling Mode of Reusable Express Packaging[J]. *Packaging Journal*, 2021, 13(5): 27-34.
- [14] 梁喜, 魏光何. 考虑社会责任和混合回收的闭环供应链决策与协调[J]. *数学的实践与认识*, 2021, 51(20): 29-44.
- LIANG Xi, WEI Guang-he. Decision Making and Coordination of Closed Loop Supply Chain Considering Social Responsibility and Hybrid Recovery[J]. *Mathematics in Practice and Theory*, 2021, 51(20): 29-44.
- [15] 许民利, 邹康来, 简惠云. “互联网+”环境下考虑消费者行为的资源回收策略[J]. *控制与决策*, 2019, 34(8): 1745-1753.
- XU Min-li, ZOU Kang-lai, JIAN Hui-yun. Strategy of Renewable Resource Recycling Considering Consumers' Behavior Based on Internet+[J]. *Control and Decision*, 2019, 34(8): 1745-1753.
- [16] 欧阳恋群, 黄帝, 丁建勋. 环境税费政策下快递包装材料回收利用的最优决策及社会福利分析[J]. *运筹与管理*, 2021, 30(4): 54-60.
- OUYANG Lian-qun, HUANG Di, DING Jian-xun. Optimal Decisions on the Cycle Utilization of Express Packaging Materials and Social Welfare Analysis under Environmental Tax Policy[J]. *Operations Research and Management Science*, 2021, 30(4): 54-60.
- [17] 何海龙, 李明琨. 有限管制下快递包装逆向物流三方博弈行为分析[J]. *工业工程与管理*, 2021, 26(1): 157-164.
- HE Hai-long, LI Ming-kun. A Tripartite Game Analysis on Reverse Logistics of Express Packaging under Restricted Control Policies[J]. *Industrial Engineering and Management*, 2021, 26(1): 157-164.
- [18] KANG P, SONG G, XU M, et al. Low-Carbon Pathways for the Booming Express Delivery Sector in China[J]. *Nat Commun*, 2021, 12(1): 450.
- [19] LIU Hui-hui, LEI Ming, DENG Hong-hui, et al. A Dual Channel, Quality-Based Price Competition Model for the WEEE Recycling Market with Government Subsidy[J]. *Omega*, 2016, 59(3): 290-302.

责任编辑: 曾钰婵