

考虑回收努力和信号博弈的EOL产品回收供应链均衡策略研究

杨家兴*, 鞠凯强, 徐 超

江西理工大学经济管理学院, 江西 赣州

收稿日期: 2025年1月1日; 录用日期: 2025年1月22日; 发布日期: 2025年1月30日

摘 要

构建由制造商、回收商组成的二级供应链博弈模型。考虑EOL产品回收市场信息不对称, 讨论制造商是否进行自主回收和付出回收努力, 对制造商建立自主回收渠道和不建立自主回收渠道两种不同情形下的供应链成员最优决策展开研究。研究结果表明, 当制造商建立自主回收渠道时, H型回收商可以通过设置最优回收量来实现利润最大化, L型回收商的最优回收量则会受制造商回收价格的影响而出现差异。

关键词

信号博弈, 逆向供应链, 供应链决策, 信息不对称

Research on the Equilibrium Strategy of EOL Product Recycling Supply Chain Considering Recycling Efforts and Signal Game

Jiaxing Yang*, Kaiqiang Ju, Chao Xu

School of Economics and Management, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou Jiangxi

Received: Jan. 1st, 2025; accepted: Jan. 22nd, 2025; published: Jan. 30th, 2025

Abstract

Construct a two-level supply chain game model composed of manufacturers and recyclers. Considering the information asymmetry of EOL product recycling market, this paper discusses whether manufacturers carry out independent recycling and makes recycling efforts, and studies the optimal decision-making of supply chain members under two different situations: The results show that

*通讯作者。

文章引用: 杨家兴, 鞠凯强, 徐超. 考虑回收努力和信号博弈的 EOL 产品回收供应链均衡策略研究[J]. 管理科学与工程, 2025, 14(1): 324-330. DOI: 10.12677/mse.2025.141032

when manufacturers establish independent recycling channels, H-type recyclers can maximize profits by setting the optimal recycling amount, while the optimal recycling volume of L-shaped recyclers will be affected by the manufacturer's recycling price.

Keywords

Signal Game, Reverse Supply Chain, Supply Chain Decisions, Information Asymmetry

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

在应对不断变化的市场环境时，新兴的再制造商不再仅依赖于从回收商处获取 EOL 产品，而是拓展了传统回收渠道之外的选项，建立了直接面向消费者的回收体系。例如，电商平台和政府补贴下的动力电池项目[1]，已经开始构建自主的回收网络。据 Forrester 的一项研究显示，76% [2]的制造商选择直接从消费者手中回收 EOL 产品，以此来降低生产成本。因此考虑信息不对称和制造商是否自建回收渠道的回收供应链均衡策略研究十分具有现实意义。

2. 文献综述

与本文相关的研究主要有以下两部分：第一，关于供应链最优决策的博弈论研究。马祖军[3]等分析了三种博弈策略下，制造商通过网络平台同时开展新产品代销与废旧品回收的最优决策及利润问题。徐建豪[4]等构建了以制造商为主导的 Stackelberg 博弈模型，探讨了制造商的风险规避行为以及回收品质量对闭环供应链成员收益和定价的影响。曲铁平[5]则考虑了零售商的广告投入，基于制造商主导的斯坦伯格博弈得出了其最优批发价和最优回收率。王红春[6]等在此基础上引入均值 - 方差法，研究了风险规避对最优期望利润、回收价格及回收量的影响。上述研究仅分析了静态市场信息关系下供应链成员对供应链决策的影响，未考虑到动态博弈市场对于供应链决策的影响。本文假设回收商拥有个人的市场需求信息，通过 EOL 产品回收量向制造商传递市场需求信号，研究动态对称信息与不对称信息下制造商自建回收渠道的问题，使得问题的研究更具现实意义。第二，关于逆向供应链的最优决策问题。苏玲等[7]构建了三个无 C2C 二手市场的闭环供应链模型(BM、BR、BT)以及三个加入二手市场的模型(SM、SR、ST)，并对其定价决策和回收渠道选择进行了分析，解决了不同回收渠道下闭环供应链的定价和渠道选择问题。卢荣花等[8]针对单一制造商，研究了在不确定需求下的再制造系统中的回收、生产和定价策略，提出再制造策略有助于降低制造商风险并提高收益。Guo Hangxin [9]等则在非对称权利结构下，分析了不同决策模式中的供应链定价策略，解决了供应链权利结构对定价决策的影响。然而，上述博弈仅关注逆向供应链中的单一因素影响的决策问题，未涉及回收努力等关键问题。本文重点探讨在不同信息结构下，回收努力水平与制造商自建回收渠道之间的相互作用，并分析回收努力对供应链成员最优决策和收益的影响。

3. 问题描述及模型构建

考虑由一个制造商和一个回收商构成的二级供应链。制造商可以选择是否建立自主回收渠道，若制造商进行自主回收则需付出回收努力 e 和相应的回收成本 $c_{(e)} = \frac{ke^2}{2}$ ，其中， $k > 0$ 表示制造商在投入回收努力方面的投资效率，类似的二次函数在前人的研究中广泛体现[10] [11]。对于相同的回收努力水平 e ，

k 越大, 回收努力成本越高, 意味着回收效率越低, 反之亦然。采用这种二次凸成本函数可以反映边际回收努力成本递增规律[12]。EOL 产品的供给函数为: $G = \varphi_d + r + \beta e (d = i, j; i = H, L; j = H, L)$ 由于制造商无法准确掌握回收市场的真实信息, 只能根据回收商的回收量来确定市场规模, 所以两者存在信号博弈。具体博弈顺序如下: (1) 制造商在回收季开始前决定回收努力 e 。(2) 在回收季开始时, 制造商设定 EOL 产品的回收价格 b 。(3) 回收商在观察到真实的回收市场情况之后确定回收量 g_n (回收商回收的产品全部被制造商回收)。(4) 若制造商建立自主回收渠道, 制造商会根据信号 g_n 更新对市场类型的信息 φ_d , 并确定自主回收量 g_m 。本文相关符号定义如表 1 所示:

Table 1. Symbol definitions

表 1. 符号定义

符号	定义
b	制造商回收价格
e	制造商回收努力
β	回收努力的有效性
k	回收努力的投资效率
c	新产品制造成本
c_r	回收产品再制造成本
r	回收商回收价格
$\Delta c = c - c_r$	制造商单位节约成本

此外, 回收市场为 H 型的概率为 ρ , 回收市场为 L 型的概率为 $(1 - \rho)$, $\mu = \rho\varphi_H + (1 - \rho)\varphi_L$ 。

4. 模型分析

4.1. 制造商不建立自主回收渠道

在该种情形下, 制造商不建立自主回收渠道, 回收商负责回收废旧产品并将其销售给制造商用于加工再制造。制造商、回收商均以自身利润最大化进行决策。

制造商、回收商的利润函数分别为:

$$\pi_m = (\Delta c - b)g_n - \frac{ke^2}{2}$$
$$\pi_n = (b - g_n + \varphi_i + \beta e)g_n \quad i \in (H, L)$$

制造商不建立自主回收渠道下供应链成员的均衡解为:

$$g_n^* = \frac{k(\Delta c + \varphi_i)}{4k - \beta^2} \quad i \in (H, L), \quad e^* = \frac{\beta(\Delta c + \mu)}{4k - \beta^2}, \quad b^* = \frac{\Delta c(2k - \beta^2) - 2k\mu}{4k - \beta^2}$$

证明: 根据逆向归纳法进行求解, 首先求回收商利润函数关于 g_n 的一阶偏导数, 令其等于零可得:

$$g_n^* = \frac{b + \varphi_i + \beta e}{2} \quad i \in (H, L); \text{ 将其代入制造商利润函数可得: } \pi_m = \frac{(\Delta c - b)(b + \varphi_i + \beta e)}{2} - \frac{ke^2}{2} \quad i \in (H, L),$$

制造商利润函数关于制造商回收价格 b 和制造商回收努力 e 的 Hessian 矩阵为: $\begin{bmatrix} -1 & -\frac{\beta}{2} \\ -\frac{\beta}{2} & -k \end{bmatrix}$ 。观察可知

$-1 < 0$ ，当 $k - \frac{\beta^2}{4} > 0$ 时，Hessian 矩阵是负定的，制造商利润函数存在极大值。令 $\frac{\partial \pi_m}{\partial b} = 0$ ， $\frac{\partial \pi_m}{\partial e} = 0$ 并联立方程即可求得 b^* ， e^* 。将 b^* 、 e^* 、 g_n^* 分别代入 π_m 、 π_n 即可得到 π_m^* 和 π_n^* ：

$$\pi_m^* = \frac{k(\Delta c + u)^2}{8k - 2\beta^2}, \quad \pi_n^* = \frac{k^2(\Delta c + \varphi_i)^2}{(\beta^2 - 4k)^2} \quad i \in (H, L)$$

命题 1：制造商无自主回收渠道时，制造商的最优回收价格为 $\frac{\Delta c(\beta^2 - 2k) + 2k\mu}{\beta^2 - 4k}$ ；制造商的最优回收努力为 $\frac{\beta(\Delta c + \mu)}{4k - \beta^2}$ ；回收商的最优回收量为 $\frac{k(\Delta c + \varphi_i)}{4k - \beta^2} \quad i \in (H, L)$ ；制造商最优期望收益为 $\frac{k(\Delta c + u)^2}{8k - 2\beta^2}$ ；回收商最优期望收益为 $\frac{k^2(\Delta c + \varphi_i)^2}{(\beta^2 - 4k)^2} \quad i \in (H, L)$ 。

4.2. 制造商建立自主回收渠道

根据 $r = G - \varphi_d - \beta e$ ($d = i, j; i = H, L; j = H, L$) 可得，对于任何给定的 g_n ，回收商希望制造商设置更低的 g_m ，以此来获得更低的 EOL 产品市场回收价格，从而获得更多的利润。

但如果制造商推断出的回收市场规模较大，则制造商的自主回收数量会较高。因此 H 类型的回收商会模仿 L 型回收商的回收量，以误导制造商认为市场类型为低类型，从而使制造商设置较低的自主回收量。而 L 类型回收商则会将自己与 H 类型回收商分隔开来，从而使制造商设置较低的自主回收量。综上所述，当制造商建立自主回收渠道时，会出现分离均衡的情况。

分离均衡意味着 H 类型回收商和 L 类型回收商会制定不同的回收数量，制造商可以根据回收商的回收量准确判断回收商的类型。根据逆向归纳法，制造商先确定最优自主回收量 g_m 。

制造商的利润函数为：

$$\pi_m = (\Delta c - b)g_n + (\Delta c - r)g_m - \frac{ke^2}{2}$$

将 $r = G - \varphi_j - \beta e \quad j \in (H, L)$ 代入制造商的利润函数可得：

$$\pi_m = (\Delta c - b)g_n + (\Delta c - g_n - g_m + \varphi_j + \beta e)g_m - \frac{ke^2}{2} \quad j \in (H, L)$$

根据一阶线性最优条件可得制造商的最优自主回收量为：

$$g_m^* = \frac{\Delta c - g_n + \varphi_j + \beta e}{2} \quad j \in (H, L)$$

回收商的利润函数为：

$$\pi_n = (b - g_n - g_m + \varphi_i + \beta e)g_n \quad j \in (H, L)$$

将制造商的最优自主回收量 $g_m^* = \frac{\Delta c - g_n + \varphi_j + \beta e}{2} \quad j \in (H, L)$ 代入回收商利润函数当中可得：

$$\pi_n = \frac{(2b - g_n - \Delta c - \varphi_j + 2\varphi_i + \beta e)g_n}{2} \quad i \in (H, L), j \in (H, L)$$

分离均衡中 H 型回收商和 L 型回收商会制定不同的策略，使用 $j(g_n)$ 表示制造商观察到回收商的回

收数量后对市场规模更新后的信念，本文应用依赖于 L 型回收商回收数量阈值 $g_{n(s)}$ 。

$$j(g_n) = \begin{cases} H, & g_n > g_{n(s)} \\ L, & g_n \leq g_{n(s)} \end{cases}$$

L 型回收商为了与 H 型回收商分隔开来，必须使 H 型回收商模仿 L 型回收商时的收益小于不模仿时的收益，当回收商回收量满足以下条件时存在精炼贝叶斯纳什均衡。

$$\max \pi_n [g_n > g_{n(s)} | H] \geq \max \pi_n [g_n \leq g_{n(s)} | H] \quad (1)$$

$$\max \pi_n [g_n \leq g_{n(s)} | L] \geq \max \pi_n [g_n > g_{n(s)} | L] \quad (2)$$

$$g_{n(s)} \geq 0 \quad (3)$$

注：等式 1 表示 H 类型回收商不模仿 L 类型回收商的决策条件；等式二表示 L 类型回收商选择与 H 类型回收商分离的决策条件；等式三确保回收商回收数量非负。

$$\text{等式 2 左边在 } g_n = \frac{2b + \varphi_L + \beta e - \Delta c}{2} \text{ 处取得最大值，最大值为：} \frac{(2b - \Delta c + \beta e + \varphi_L)^2}{8}$$

$$\text{等式 2 右边 } \max \pi_n [g_n > g_{n(s)} | L] = \frac{(2b - g_n - \Delta c - \varphi_H + 2\varphi_L + \beta e) g_n}{2}$$

联立两个式子得到：

$$\frac{(2b - \Delta c + \beta e + \varphi_L)^2}{8} \geq \frac{(2b - g_n - \Delta c - \varphi_H + 2\varphi_L + \beta e) g_n}{2}$$

求解得到 L 型回收商的最优回收数量为：

$$g_{n_L}^* = \begin{cases} \frac{2b - \Delta c + \beta e - \varphi_H + 2\varphi_L + \sqrt{(-4b + 2\Delta c - 2\beta e + \varphi_H - 3\varphi_L)(\varphi_H - \varphi_L)}}{2}, & b \leq \frac{2\Delta c - 2\beta e + \varphi_H - 3\varphi_L}{4} \\ \frac{2b + \varphi_L + \beta e - \Delta c}{2}, & b > \frac{2\Delta c - 2\beta e + \varphi_H - 3\varphi_L}{4} \end{cases}$$

H 型回收商的最优回收量为：

$$g_{n_H}^* = \frac{2b + \varphi_H + \beta e - \Delta c}{2}$$

4.2.1. 自然分离下供应链各成员均衡解及最优期望收益

$$e^* = \frac{\beta(\Delta c + \mu)}{2k - \beta^2}$$

$$b^* = \frac{k\mu + \Delta c(\beta^2 - k)}{\beta^2 - 2k}$$

$$g_{n_H}^* = \frac{\varphi_H - \mu}{2}, \quad g_{n_L}^* = \frac{\varphi_L - \mu}{2}$$

$$g_{m_H}^* = \frac{1}{4} \left[2\Delta c + \varphi_H + \mu - \frac{2\beta^2(\Delta c + \mu)}{\beta^2 - 2k} \right], \quad g_{m_L}^* = \frac{1}{4} \left[2\Delta c + \varphi_L + \mu - \frac{2\beta^2(\Delta c + \mu)}{\beta^2 - 2k} \right]$$

$$\text{证明：将 } g_{n_H}^* = \frac{2b + \varphi_H + \beta e - \Delta c}{2}, \quad g_{n_L}^* = \frac{2b + \varphi_L + \beta e - \Delta c}{2}, \quad g_m^* = \frac{\Delta c - g_n + \varphi_j + \beta e}{2} \quad j \in (H, L) \text{ 分别代}$$

入制造商利润函数。分别求制造商利润函数关于制造商回收价格 b 和制造商回收努力 e 一阶偏导数，令其等于零并联立方程组即可求得 e^* 、 b^* 。再将 e^* 、 b^* 代入 g_m^* 、 g_n^* 即可求得 $g_{n_H}^*$ 、 $g_{n_L}^*$ 、 $g_{m_H}^*$ 、 $g_{m_L}^*$ 。最后将求得的各决策变量代入制造商、回收商利润函数即可得到 $\pi_{n_H}^*$ 、 $\pi_{n_L}^*$ 、 π_m^* ：

$$\pi_{n_H}^* = \frac{1}{8}(\varphi_H - \mu)^2, \quad \pi_{n_L}^* = \frac{1}{8}(\varphi_L - \mu)^2$$

$$\pi_m^* = \frac{1}{16} \left[\rho \left((\varphi_H - \mu)^2 - \frac{8k(\Delta c + \mu)(\Delta c + 2\varphi_H - \mu)}{\beta^2 - 2k} \right) + (1 - \rho) \left((\varphi_L - \mu)^2 - \frac{8k(\Delta c + \mu)(\Delta c + 2\varphi_L - \mu)}{\beta^2 - 2k} \right) \right]$$

4.2.2. 成本分离下供应链各成员均衡解及最优期望收益

$$e^* = \frac{\beta(\Delta c + \mu)}{2k - \beta^2}$$

$$b^* = \frac{\Delta c}{2} + \frac{\varphi_H}{4} - \frac{3\varphi_L}{4} - \frac{(\Delta c + \mu)\beta^2}{4k - 2\beta^2}$$

$$g_{n_H}^* = \frac{3}{4}(\varphi_H - \varphi_L), \quad g_{n_L}^* = \frac{1}{2} \left[2\varphi_L - \varphi_H - \mu + \sqrt{(\varphi_H - \varphi_L)(\varphi_H - 3\varphi_L + 2\mu)} \right]$$

$$g_{m_H}^* = \frac{1}{8} \left[\varphi_H + 3\varphi_L - 4\mu - \frac{8k(\Delta c + \mu)}{\beta^2 - 2k} \right]$$

$$g_{m_L}^* = \frac{1}{4} \left[2\Delta c + \varphi_H + \mu - \sqrt{(\varphi_H - \varphi_L)(\varphi_H - 3\varphi_L + 2\mu)} - \frac{2\beta^2(\Delta c + \mu)}{\beta^2 - 2k} \right]$$

证明：证明过程同上，在成本分离均衡解的求解过程中，

$$g_{n_L}^* = \frac{(2b - \Delta c + \beta e - \varphi_H + 2\varphi_L + \sqrt{(-4b + 2\Delta c - 2\beta e + \varphi_H - 3\varphi_L)(\varphi_H - \varphi_L)})}{2}。$$

$$\pi_{n_H}^* = \frac{9}{32}(\varphi_H - \varphi_L)^2$$

$$\pi_{n_L}^* = -\frac{1}{8} \left[2\varphi_L - \varphi_H - \mu + \sqrt{\alpha} \right] \left[3\varphi_L - 2\varphi_H - \mu + \sqrt{\alpha} \right]$$

$$\pi_m^* = \frac{1}{64} \left[\rho \left(-11\varphi_H^2 + 54\varphi_H\varphi_L - 27\varphi_L^2 - 32\varphi_H\mu + 16\mu^2 - 4\beta \right) \right. \\ \left. + 4(1 - \rho) \left(4\varphi_H^2 - 14\varphi_H\varphi_L + 15\varphi_L^2 + 6\varphi_H\mu - 16\varphi_L\mu + 5\mu^2 - 4\varphi_H\sqrt{\alpha} + 6\varphi_L\sqrt{\alpha} - 2\mu\sqrt{\alpha} - \beta \right) \right]$$

$$\text{注： } \alpha = (\varphi_H - \varphi_L)(\varphi_H - 3\varphi_L + 2\mu), \quad \beta = \frac{8k(\Delta c + \mu)(\Delta c + 2\varphi_L - \mu)}{\beta^2 - 2k}。$$

命题 2：在分离均衡中，H 型回收商通常用选择最优回收量来最大化其收益。由于信息不对称，L 型回收商的回收量会表现出分段特征。当回收价格较高时，L 型回收商无需任何额外努力就能与 H 型回收商实现分离，即自然分离。若回收价格较低，L 型回收商则通过降低回收量，使 H 型回收商的模仿成本上升。当 L 型回收商采取次优回收量 $g_{n_L}^*$ 时，H 型回收商因高模仿成本而放弃模仿，从而实现成本分离。

5. 结束语

本文研究了制造商的回收努力投入，讨论了非对称信息下制造商是否自建回收渠道与回收努力投入的关系以及对其他供应链成员决策及其收益的影响。研究发现：不建立自主回收渠道时，制造商收益不

受市场信息的影响。建立自主回收渠道且当制造商回收数量较大时, H 型回收商受益, 当制造商回收数量较小时, L 型回收商受益。因此, 当制造商从回收商处回收数量较低时, 制造商应自建回收渠道通过加大回收努力与回收商展开竞争。

参考文献

- [1] 武文琪, 张明. 补贴政策下动力电池闭环供应链定价与协调策略[J]. 工业工程与管理, 2024, 29(5): 147-158.
- [2] 史保莉, 徐琪, 朱晨. 考虑广告努力和信号博弈的双渠道供应链均衡策略[J]. 工业工程与管理, 2023, 28(3): 52-60.
- [3] 马祖军, 徐子琪, 闫彦超. 线上代销/回收下考虑废旧品质量分级的闭环供应链决策[J]. 工业工程与管理, 2024, 29(4): 148-157.
- [4] 徐建豪, 楼振凯. 回收品质不确定下考虑信息不对称的闭环供应链决策分析[J]. 青岛大学学报(自然科学版), 2024, 37(4): 68-73.
- [5] 曲铁平, 彭涛. 考虑广告和回收策略的闭环供应链研究[J]. 沈阳理工大学学报, 2018, 37(4): 92-94.
- [6] 王红春, 林彩凤. 基于风险规避的双渠道闭环供应链回收决策研究[J]. 会计之友, 2024(7): 58-67.
- [7] 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[J]. 管理学报, 2022, 19(4): 584-594.
- [8] 卢荣花, 李南. 不确定需求下再制造系统回收、生产与定价策略研究[J]. 数学的实践与认识, 2016, 46(9): 31-39.
- [9] Guo, H.X., Liu, Z., Hu, B., *et al.* (2021) Pricing and Coordination Mechanism of Supply Chain Considering Product Recycling under Asymmetric Power. *Mathematical Problems in Engineering*. <https://doi.org/10.1155/2021/5579655>
- [10] Zhu, W.G. and He, Y.J. (2017) Green Product Design in Supply Chains under Competition. *European Journal of Operational Research*, **258**, 165-180. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2016.08.053>
- [11] Raj, A., Biswas, I. and Srivastava, S.K. (2018) Designing Supply Contracts for the Sustainable Supply Chain Using Game Theory. *Journal of Cleaner Production*, **185**, 275-284. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.03.046>
- [12] Lu, L.H., Gou, Q.L., Tang, W.S., *et al.* (2016) Joint Pricing and Advertising Strategy with Reference Price Effect. *International Journal of Production Research*, **54**, 5250-5270. <https://doi.org/10.1080/00207543.2016.1165878>