

# 考虑分类回收影响下的逆向供应链合作模式研究

张 澳

江南大学商学院，江苏 无锡

收稿日期：2024年2月20日；录用日期：2024年3月11日；发布日期：2024年4月26日

## 摘要

为研究分类回收下的逆向供应链当中各个主体的合作模式的选择，本文运用博弈论构建了包括制造商、零售商和回收商的逆向供应链，研究了不同的合作模式的逆向供应链各个主体和整体供应链的收益水平，并对不同的模式进行比较分析，探讨了分类回收收益对各个主体影响。研究表明，各个主体选择的合作策略与类回收收益相关，若回收分类收益较小时，制造商与零售商合作的动机更大，当回收分类收益较大时，制造商倾向与回收商合作，同时，不同的分类回收收益也会影响到整体供应链的收益。

## 关键词

逆向供应链，分类回收，Stackelberg博弈

# Research on Reverse Supply Chain Cooperation Model Considering the Impact of Classification Recycling

Ao Zhang

School of Business, Jiangnan University, Wuxi Jiangsu

Received: Feb. 20<sup>th</sup>, 2024; accepted: Mar. 11<sup>th</sup>, 2024; published: Apr. 26<sup>th</sup>, 2024

## Abstract

To study the selection of cooperation modes among various entities in the reverse supply chain under classified recycling, this paper uses game theory to construct a reverse supply chain that includes manufacturers, retailers, and recyclers. The profit levels of each entity and the overall

supply chain in the reverse supply chain under different cooperation modes are studied, and different modes are compared and analyzed to explore the impact of classified recycling revenue on each entity. Research has shown that the cooperation strategies chosen by various entities are related to class recycling benefits. If the recycling classification benefits are small, the motivation for manufacturers and retailers to cooperate is greater. When the recycling classification benefits are large, manufacturers tend to cooperate with recyclers. At the same time, different classification recycling benefits can also affect the overall supply chain revenue.

## Keywords

**Reverse Supply Chain, Classified Recycling, Stackelberg Game**

Copyright © 2024 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

科技的迅猛发展在提高人们生活质量的同时，也给我们所生活的环境带来了巨大的压力。改革开放三十多年来，我国的经济取得了令世界瞩目的成就。近年来，我国的GDP增长率均保持在8%以上，但这是以资源的过度消耗、环境的过度污染换取的，而这些又会进一步的制约经济的发展。随着人们环境保护意识的增强，政府宣传力度的提高，以及各种相关政策、法规的出台，废旧产品资源的合理利用已经越来越受到了人们的重视。而资源的循环利用正是解决资源匮乏、环境污染问题的一个重要方法。

近年来，随着我国经济的崛起以及技术的发展，电子产品的生产、淘汰以及废弃也愈演愈烈。据相关统计，2019年，电视机的产量约14,525万台、洗衣机约6234万台、冰箱约10,232万台、电脑约36,520万台，我国的电子产品报废也达到了一定的高峰期。2020年1月1日起开始实施的《废弃电器电子产品回收处理管理条例》对废旧电子产品的回收提出了相关的技术要求，并对适用范围做出了规定。2020年1月1日起正式实施的《废弃电器电子产品回收处理管理条例》，得到了许多家电企业的积极响应。有的企业进入电子产品回收这个领域的时间比较早，已经建立了比较完善的回收处理体系。如TCL已经在北京和天津建立了两家从事环保产业的基地。生产制造型企业进入电子产品的回收领域在一定程度上缓解了资源浪费的问题，提高了资源的利用率。海尔智家在全国已具备了“销售到村”的营销网、“送货到门”的物流网、“灵活高效”的渠道网和“服务到户”的服务网，并依托3.2万家线下门店、10万余名服务人员、100余个物流配送中心等打造全域化、可视化、规范化的废旧家电回收体系。2022年，海尔智家回收废旧家电613万台，有效的减少了环境污染。

在十四五期间，国家提出了要“推动绿色发展，促进人与自然和谐共生”的口号，强调要增强社会废旧资源和垃圾资源的利用效率。废旧产品和部分垃圾产品的分类回收作为全面资源分类的基础和分类加工的前提，是增强社会废旧和垃圾资源回收再利用效率的首要任务，也是“十四五”期间废旧和垃圾资源回收体系建设的主要保证。在实施绿色循环发展，构建生态文明和谐社会的大背景下，我国从2017年开始推动各个城市的废旧产品分类回收循环体系的建设。截至到2021年，全国已有40多个城市及示范区实施了废旧垃圾产品分类回收的战略，强制居民、企业和其他单位进行强制的废旧产品回收再利用，构建完整的废旧产品回收再利用的渠道。

逆向供应链最早时由Rogers和Lembke(1999)提出，逆向物流是指设计、实施和控制原材料、中间产品、成品和相关信息，从消费使用地到产品生产地的有效、低成本流动的整体过程，以重新获得废旧

产品的剩余使用价值，并且科学、可持续发展的处置社会所生产的废物。这一概念大大扩展了逆向物流的范畴[1]。在逆向供应链的合作策略方面，Xie (2017)虑了一个由制造商和零售商组成的绿色封闭供应链。在考虑零售商销售努力的基础上，深入分析了供应链成员在上述两种情况下的决策及其原因。根据该模型设计了一个具有利润共享契约协调公平的绿色逆向供应链。最后通过数值仿真验证了模型的正确性[2]。Zhang (2020)研究了在竞争市场中进行再制造的逆向供应链，其中供应链是价格接受者。考虑 Stackelberg 博弈框架，其中制造商(领导者)对零售商(追随者)有足够的渠道权力同时开发了分析模型，以表明在竞争市场中采用再制造的逆向供应链可以通过制造商和零售商之间的合同实现与集中协调渠道相同的回报率[3]。Zhao (2017)提出了供应链协调机制能够缓解新旧产品零售价格竞争并且提高制造商和回收商的双渠道逆向供应链回收率和总利润方面的有效性，同时提出了旧产品质量的提高在某些情况下甚至可能使整个供应链恶化[4]。Aydin R (2016)针对具有不同定价策略的两种不同场景形成了三种博弈论模型，即基于 Stackelberg 均衡和 Nash 均衡的非合作定价场景，以及合作博弈模型中的联合定价场景，得出利益相关者最好合作制定定价和制造决策[5]。Jian J (2021)考虑了存在废旧产品回收竞争和新产品与废旧产品竞争的逆向供应链(CLSC)并研究了制造商选择的三种竞争场景。首先，制造商没有建立完整的 CLSC，其次，制造商选择建立自己的收集网络，制造商和再制造商在回收市场上展开竞争[6]。Ji (2015)探讨了一个由制造商和零售商组成的双通道逆向供应链(CLSC)系统。制造商是 CLSC Stackelberg 的领导者通过考虑几种营销努力支持模型即制造商是投资者的模型、零售商是投资者的模型和集中式 CLSC 系统来研究营销努力对供应链成员的最优决策和利润的影响[7]。Saha S (2018)研究了当再制造成本中断时，一个制造商和两个竞争零售商的逆向供应链(CLSC)中的生产和协调决策。我们发现定价和生产数量决策在面临中断时具有某些稳健区域；零售商之间的竞争越激烈，鲁棒性区域越小[8]。Huang Z (2017)构建了一个由制造商、零售商和网络回收平台组成的双渠道逆向供应链模型。结果表明再制造商提高转移支付价格以放弃收入和费用分摊合同下的部分利润[9]。

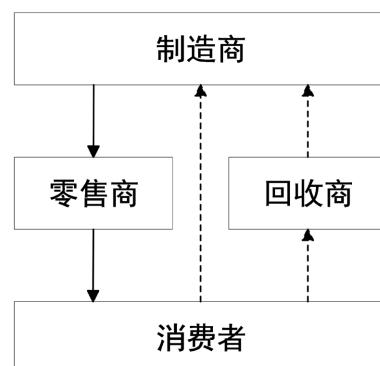
关于存在分类回收的逆向供应链的在近年来开始引起学者的重视，孙嘉轶(2023)基于分类回收实施策略的不同组合，构建由一个制造商、一个零售商、先行回收商及滞后回收商构成的逆向供应链决策模型，分析回收竞争及分类回收相关参数对逆向供应链回收及定价决策的影响，研究回收商分类回收的动机与效果，提出先行回收商的横向及纵向共谋策略，并验证其可行性[10]。王陈轶(2022)运用了计量学的相关方法研究上海居民进行废旧产品和垃圾分类行为时的规律及影响因素，研究发现上海居民对废旧产品和垃圾分类容易出现一定的认知偏差，居民对废旧产品和垃圾的分类准确率在知识水平、家庭成员数量、家庭财富上具有显著差异[11]。巫瑞(2022)认为对废旧产品分类回收时实行资源分类和回收处理、循环利用的基础，为研究政府不同的奖惩措施和奖惩标准对逆向供应链各个主体的决策和供应链协调的影响，基于斯坦伯格理论和当前的回收政策建立了由制造商和回收商构建的基础逆向供应链模型，研究得到不同的奖惩手段和标准对制造商和回收商的最优决策由一定的影响，对回收商进行激励并不一定能够增高废旧产品的回收率[12]。夏西强(2022)基于分类回收费用不同承担模式构建由一个回收商和一个制造商参与的分散决策与集中决策博弈模型。研究结果表明：1) 分类回收可以同时增加回收商和制造商收益，但是只有当消费者对废旧产品价格的敏感度小于某一阈值时，制造商和回收商才愿意进行分类回收；2) 分散决策模式下，制造商和回收商共同承担分类回收费用模式优于只有其中一方承担分类回收费用模式；集中决策模式下，分类回收努力程度、废旧产品回收数量和回收渠道收益均优于分散决策情形[13]。李飚(2022)分析分类回收对废旧产品回收处理的影响，分别基于无分类回收、制造商负责分类回收、回收商负责分类回收和集中决策四种情形构建废旧产品回收的博弈模型，在制造商和回收商愿意进行分类回收的边界内，回收商进行分类回收不仅能够降低制造商的回收成本，还可以同时增加制造商和回收商收益；集中决策时，进行分类回收可以提高回收渠道整体收益[14]。赵强(2020)基于分类回收构建政府补贴下回

收商与制造商博弈模型。基于博弈模型最优解，对比分析分类回收与不分类回收优劣；分析政府选取不同补贴对象对回收商与制造商竞争的影响；基于成本分摊-收益共享契约给出回收商与制造商合作回收机制。研究主要结论：分类回收不仅对制造商有利，还对回收商有利[15]。

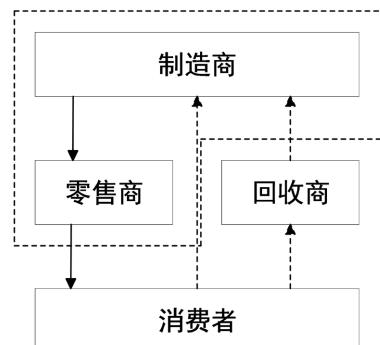
随着人们环保意识的增强以及供应链体系的不断发展，我国关于逆向供应链的研究早已不再仅仅局限于逆向供应链的理论、网络设计等方面。但是关于分类回收当中各个主体之间的合作模式和不同的政策激励对逆向供应链的影响的研究较为薄弱，本文从废旧产品回收分类的现状出发，对废旧产品回收分类的逆向供应链建立模型，研究合作模式对废旧产品回收分类逆向供应链所带来的影响。本文将逆向供应链各参与主体结合起来，研究关于存在废旧产品分类的逆向供应链问题，丰富了逆向供应链的理论范围。

## 2. 问题描述

本文的研究对象为基础的逆向供应链模型，其中包括制造商、零售商、回收商。其中制造商负责将新产品批发给零售商，自身进行废旧产品回收的同时也委托第三方回收商对废旧产品进行回收，回收商并不负责废旧产品的分类工作，只进行旧产品的回收工作，由制造商对废旧产品进行分类，零售商负责对消费者进行新产品的销售，共存在以下四种合作策略：1) 供应链当中的三个主体相互独立，不进行合作，此时为模式(N)，如图 1 所示；2) 制造商仅与零售商组成一个合作组织(MR)，如图 2 所示；3) 制造商仅与回收商组成合作组织(MC)，如图 3 所示；4) 供应链当中的三个主体共同合作，即制造商、零售商、回收商组成合作组织(MRC)如图 4 所示。



**Figure 1.** N mode  
**图 1.** N 模式



**Figure 2.** MR mode  
**图 2.** MR 模式

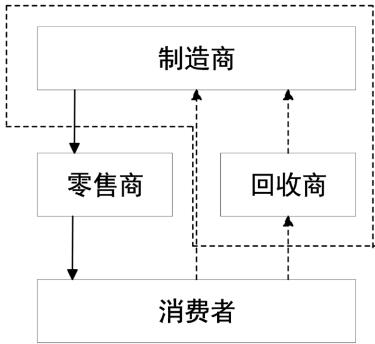


Figure 3. MC mode

图 3. MC 模式

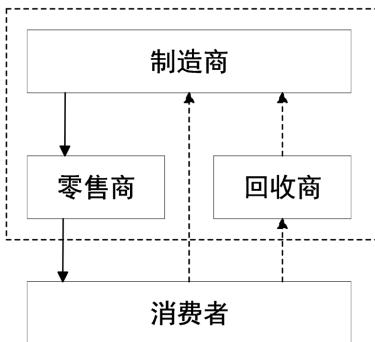


Figure 4. MRC mode

图 4. MRC 模式

## 2.1. 符号说明

$\tau_i$ ：其中  $i \in \{m, c\}$ ，表示制造商和回收商对废旧产品的回收率。

$w$ ：制造商所制定的单位产品的批发价格。

$q = 1 - p$ ：制造商产品的需求函数，其中  $p$  和  $q$  分别表示产品的零售商售价和市场的需求量。

$b$ ：制造商向回收商支付的单位废旧产品转移支付价格。

$c_m$ ：制造商进行新产品的生产时所需要的单位零件材料成本。

$c_r$ ：制造商对废旧产品进行分类和处理后，用其材料进行新产品的生产所需要的单位成本，同时  $c_m - c_r > 0$ 。

$\Delta$ ：使用旧产品所加工所得材料的产品生所节约的成本，即  $c_m - c_r = \Delta$ 。

$I_i$ ：制造商和回收商的废旧产品回收投资成本， $I_i = k\tau_i^2, i \in \{r, c\}$ ， $k$  是回收成本系数， $k$  越小表示制造商和回收商的收到单位废旧产品所需要成本越低；参考文献[15]，本文假设制造商和回收商之间的回收不存在回收竞争。

$\pi_i^j$ ：当制造商确定不同的合作模式  $j$  时，合作主体  $i$  的整体效益，其中  $i \in \{m, r, c, s\}$ ， $j \in \{M, MR, MC, MRC\}$ 。

$\theta$ ：参考文献[16]表示分类回收单位的分类努力程度，其中  $\theta > 0$ ， $g$  表示单位分类努力成本的成本系数，且  $g > 0$ 。WEEE 分类回收成本是分类回收努力程度  $\theta$  的二次函数，即制造商所承担的回收成本为  $g\theta^2/2$ 。

$\delta$ ：参照文献[16]， $\delta$  表示单位分类回收收益系数，且  $\delta > 0$ 。假设每单位分类回收努力程度给制造

商带来的收益与分类回收努力程度成正比，即进行分类回收时，每单位分类回收努力程度给制造商带来的收益为 $\delta\theta$ 。

## 2.2. 模型假设

假设1 在 Stackelberg 博弈当中，制造商为新产品市场主导者和旧产品回收渠道的主导者，零售商和回收商均为新产品市场和废旧产品回收渠道中的追随者；

假设2 制造商利用废旧产品分类后所生产新产品与用全新零件所生产的新产品不存在质量和其他差异，两者的批发价格和售价相同[13]；

假设3 假设回收商支付给消费者的废旧产品的单位固定费用为 $A$ ，其中 $b > A$ 。为不失一般性，设 $A = 0$ 。其中当 $A$ 不为0时，不会改变本文的结论，只会增加数学计算的复杂性[17]；

假设4 参考文献[17]，当前国内外的废旧产品的回收率普遍处以较低的水准，因此回收成本系数设定为大于某一固定值， $k > k_0$ ， $k_0 = \Delta + \delta\theta$ 。这能够保证本文的模型有最优解，同时也能够保证制造商和回收商的回收率之和小于1，即 $(\tau_m + \tau_c) \in (0, 1)$ 。

## 3. 合作模型求解

首先对各个供应链主体的收益函数进行建模，制造商的利润受批发价格、废旧产品处理成本和收益、分类回收成本和收益影响，零售商的利润受批发价格、新产品的市场需求量的影响，回收商的利益受废旧产品回收成本和制造商的转移支付成的影响，具体如下所示：

$$\pi_m = (w - c_m + (\delta\theta + \Delta)(\tau_m + \tau_c))q - b\tau_c q - k\tau_m^2 - \frac{g\theta^2}{2} \quad (1)$$

$$\pi_r = (p - w)q \quad (2)$$

$$\pi_c = b\tau_c q - k\tau_c^2 \quad (3)$$

其中 $\pi_m$ 表示制造商利润函数， $\pi_r$ 表示零售商利润函数， $\pi_c$ 表示回收商利润函数。

### 3.1. 制造商与零售商和回收商均合作模型——Model MRC

制造商与回收商、零售商共同合作时，其可以看做一个理想化的供应链合作组织，在此合作模式下，三者都已供应链的收益最优为目标，保证供应链整体的收益最大，其中需要三者共同确定的参数包括新产品的零售价格，废旧产品的回收率，整体利润的目标函数如下：

$$\max_{p, \tau_r, \tau_c} \pi_s^{MRC} = (w - c_m + (\delta\theta + \Delta)(\tau_m + \tau_c))q - k\tau_m^2 - \frac{g\theta^2}{2} + (p - w)q - k\tau_c^2 \quad (4)$$

通过对 $p, \tau_m, \tau_c$ 求二阶偏导，可以得出函数关于 $p, \tau_m, \tau_c$ 的海瑟矩阵，令函数关于 $p, \tau_r, \tau_c$ 的一阶偏导等于零即可求出 $p^{MRC*}, \tau_m^{MRC*}, \tau_c^{MRC*}$ 最优解，具体结果如下所示：

$$p^{MRC*} = \frac{\delta^2\theta^2 + 2\Delta\delta\theta + \Delta^2 - c_m k - k}{\delta^2\theta^2 + 2\Delta\delta\theta + \Delta^2 - 2k}, \quad \tau_m^{MRC*} = \frac{(\delta\theta + \Delta)(c_m - 1)}{2\delta^2\theta^2 + 4\Delta\delta\theta + 2\Delta^2 - 4k}$$

$$\tau_c^{MRC*} = \frac{(\delta\theta + \Delta)(c_m - 1)}{2\delta^2\theta^2 + 4\Delta\delta\theta + 2\Delta^2 - 4k}.$$

$$\pi_s^{MRC*} = \frac{\delta^2 g\theta^4 + 2\Delta\delta g\theta^3 - 2\left(-\frac{\Delta^2}{2} + k\right)g\theta^2 + k(c_m - 1)^2}{-2\delta^2\theta^2 - 4\Delta\delta\theta - 2\Delta^2 + 4k}.$$

### 3.2. 无合作模型——Model N

在无合作模型下，供应链当中各个主体都不于其他主体进行合作，每个主体确定自身的最优参数，具体的决策顺序如下，首先，制造商确定产品批发价格  $w$ ，回收率  $\tau_m$  和回收价格  $b$ ，随后，回收商决定回收率  $\tau_c$ ；最后，零售商设置新产品的零售价格  $p$ ，供应链各个成员的目标函数如下：

$$\pi_m^N = (w - c_m + (\delta\theta + \Delta)(\tau_m + \tau_c))q - b\tau_c q - k\tau_m^2 - \frac{g\theta^2}{2} \quad (5)$$

$$\pi_r^N = (p - w)q \quad (6)$$

$$\pi_c^N = b\tau_c q - k\tau_c^2 \quad (7)$$

利用逆向求解法，先求出零售商的最优销售价格  $p^N$ ，然后代入到回收商的利润函数中，求出其回收率  $\tau_c^N$ ，最后代入到制造商的利润当中，求出制造商的最优批发价格  $w^{N*}$ ，最优回收价格  $b^{N*}$ ，最优回收率  $\tau_m^{N*}$ ，将  $w^{N*}, b^{N*}, \tau_m^{N*}$  代到上述的决策变量当中，得到  $p^{N*}, \tau_c^{N*}$ 。在  $k > \frac{3(\Delta + \theta\delta)^2}{16}$  的情况下，上述模型存在最优解，具体结果如下：

$$\begin{aligned} w^{N*} &= \frac{-3\Delta^2 - 6\Delta\delta\theta - 3\delta^2\theta^2 + 8k(c_m + 1)}{-3\delta^2\theta^2 - 6\Delta\delta\theta - 3\Delta^2 + 16k}, \quad b^{N*} = \frac{\delta\theta}{2} + \frac{\Delta}{2} \\ \tau_m^{N*} &= \frac{2(\delta\theta + \Delta)(1 - c_m)}{-3\delta^2\theta^2 - 6\Delta\delta\theta - 3\Delta^2 + 16k}, \quad \tau_c^{N*} = \frac{(\delta\theta + \Delta)(c_m - 1)}{3\delta^2\theta^2 + 6\Delta\delta\theta + 3\Delta^2 - 16k} \\ p^{N*} &= \frac{-3\Delta^2 - 6\Delta\delta\theta - 3\delta^2\theta^2 + 4k(c_m + 3)}{-3\delta^2\theta^2 - 6\Delta\delta\theta - 3\Delta^2 + 16k}, \\ \pi_m^{N*} &= \frac{3\delta^2 g\theta^4 + 6\Delta\delta g\theta^3 - 16\left(-\frac{3\Delta^2}{16} + k\right)g\theta^2 + 4k(c_m - 1)^2}{-6\delta^2\theta^2 - 12\Delta\delta\theta - 6\Delta^2 + 32k} \\ \pi_r^{N*} &= \frac{16k^2(c_m - 1)^2}{(3\delta^2\theta^2 + 6\Delta\delta\theta + 3\Delta^2 - 16k)^2}, \quad \pi_c^{N*} = \frac{(\delta\theta + \Delta)^2 k(c_m - 1)^2}{(3\delta^2\theta^2 + 6\Delta\delta\theta + 3\Delta^2 - 16k)^2}. \end{aligned}$$

### 3.3. 制造商与零售商合作模型——Model MR

制造商仅与零售商进行合作，两者形成一个合作组织，回收商不参与合作组织的决策，此时博弈顺序为：首先，合作组织设定产品售价  $p$  和回收价格  $b$ ，并确定合作组织的旧产品回收率  $\tau_m$ （该回收率仅包括制造商的回收率）；随后，回收商决定其回收率  $\tau_c$ ，该问题转化为如下模型：

$$\max_{p, \tau_m, b} \pi_{m+r}^{MR} = (w - c_m + (\delta\theta + \Delta)(\tau_m + \tau_c))q - b\tau_c q - k\tau_m^2 - \frac{g\theta^2}{2} + (p - w)q \quad (8)$$

$$\pi_c^{MR} = b\tau_c q - k\tau_c^2 \quad (9)$$

计算方法与上文 N 模型类似，利用逆向求解法求解，在的情况下，得出如下结果：

$$\tau_m^{MR*} = \frac{2(\delta\theta + \Delta)(1 - c_m)}{-3\delta^2\theta^2 - 6\Delta\delta\theta - 3\Delta^2 + 8k}, \quad \tau_c^{MR*} = \frac{(\delta\theta + \Delta)(c_m - 1)}{3\delta^2\theta^2 + 6\Delta\delta\theta + 3\Delta^2 - 8k}$$

$$p^{MR*} = \frac{-3\Delta^2 - 6\Delta\delta\theta - 3\delta^2\theta^2 + 4k(c_m + 1)}{-3\delta^2\theta^2 - 6\Delta\delta\theta - 3\Delta^2 + 8k}$$

$$\pi_{m+r}^{MR^*} = \frac{3\delta^2 g \theta^4 + 6\Delta \delta g \theta^3 - 8g \left( -\frac{3\Delta^2}{8} + k \right) \theta^2 + 4k(c_m - 1)^2}{-6\delta^2 \theta^2 - 12\Delta \delta \theta - 6\Delta^2 + 16k}$$

$$\pi_c^{MR^*} = \frac{(\delta\theta + \Delta)^2 k (c_m - 1)^2}{(3\delta^2 \theta^2 + 6\Delta \delta \theta + 3\Delta^2 - 8k)^2}, \quad b^{MR^*} = \frac{\delta\theta}{2} + \frac{\Delta}{2}.$$

### 3.4. 制造商与回收商合作——Model MC

制造商仅与回收商合作，两者形成一个合作组织，零售商不参与合作组织的决策。该合作策略下博弈顺序为：首先，合作组织确定其回收率(回收率  $\tau_c$  和  $\tau_m$ )并设置产品批发价格  $w$ ，随后，零售商设定其产品售价  $p$ 。该问题转化为如下模型：

$$\max_{\tau_c, \tau_m, w} \pi_{m+c}^{MC} = (w - c_m + (\delta\theta + \Delta)(\tau_m + \tau_c))q - k\tau_m^2 - \frac{g\theta^2}{2} - k\tau_c^2 \quad (10)$$

$$\pi_r^{MC} = (p - w)q \quad (11)$$

计算方法与上文模型类似，利用逆向求解法求解，具体结果如下：

$$\tau_c^{MC*} = \frac{(\delta\theta + \Delta)(c_m - 1)}{2\delta^2 \theta^2 + 4\Delta \delta \theta + 2\Delta^2 - 8k}, \quad \tau_m^{MC*} = \frac{(\delta\theta + \Delta)(c_m - 1)}{2\delta^2 \theta^2 + 4\Delta \delta \theta + 2\Delta^2 - 8k}$$

$$w^{MC*} = \frac{\delta^2 \theta^2 + 2\Delta \delta \theta + \Delta^2 - 2c_m k - 2k}{\delta^2 \theta^2 + 2\Delta \delta \theta + \Delta^2 - 4k}, \quad p^{MC*} = \frac{\delta^2 \theta^2 + 2\Delta \delta \theta + \Delta^2 - c_m k - 3k}{\delta^2 \theta^2 + 2\Delta \delta \theta + \Delta^2 - 4k}$$

$$\pi_r^{MC*} = \frac{k^2 (c_m - 1)^2}{(\delta^2 \theta^2 + 2\Delta \delta \theta + \Delta^2 - 4k)^2}$$

$$\pi_{m+c}^{MC*} = \frac{\delta^2 g \theta^4 + 2\Delta \delta g \theta^3 - 4 \left( -\frac{\Delta^2}{4} + k \right) g \theta^2 + k(c_m - 1)^2}{-2\delta^2 \theta^2 - 4\Delta \delta \theta - 2\Delta^2 + 8k}.$$

## 4. 均衡分析

命题 1：回收成本与废旧产品的回收率的关系

$$\frac{\partial \tau_i^{j*}}{\partial k} < 0, \quad \frac{\partial \tau_i^{j*}}{\partial k} < 0, \quad \frac{\partial \pi_i^{j*}}{\partial k} < 0, \quad \frac{\partial w^{j*}}{\partial k} > 0, \quad \frac{\partial p^{j*}}{\partial k} > 0, \quad j = \{N, MR, MC, MRC\}, \quad i = \{m, r, c, s\}$$

命题 1 表明，在所有的模式下，回收成本的增加导致废旧产品的回收率降低。降低了制造商所获取废旧产品的数量，从而无法实现产品的降本，影响到制造商的收益，推动产品批发价格上涨。由此，零售商只能被迫提高售价，导致整体效益下降。由此可见回收竞争的加剧将使逆向供应链的整体效益的下降。

命题 2：支付价格的大小关系

无合作策略 N 与制造商与回收商的合作策略 MC 中，产品批发价格的大小关系为：  $w^{N*} > w^{MC*}$

证明：

$$w^{N*} - w^{MC*} = -\frac{2k(\delta\theta + \Delta)^2 (c_m - 1)}{(-3\delta^2 \theta^2 - 6\Delta \delta \theta - 3\Delta^2 + 16k)(-\delta^2 \theta^2 - 2\Delta \delta \theta - \Delta^2 + 4k)}$$

因为  $k > \frac{3(\Delta + \theta\delta)^2}{16}$  且  $k > k_0$ , 易得  $w^{N^*} > w^{MC^*}$ 。

制造商仅与回收商合作(MC)时产品批发价格低于制造商、零售商和回收商三者均不合作时(N)的产品批发价格。其原因是无合作模式下, 供应链各成员各自追求自身利润最大化, 竞争程度加大, 制造商节约的成本较低, 仅为  $(\Delta - b)(\tau_c^{N^*} + \tau_r^{N^*})$ , 因此该合作模式下制造商会设置较高的产品批发价格以获得较高的收益。当制造商与回收商合作时, 组成的合作组织因回收再制造所节约的材料成本为  $\Delta(\tau_c^{N^*} + \tau_r^{N^*})$ , 生产成本的降低使得产品的批发价格较低。

### 命题3: 产品需求量和零售价格的关系

在制造商与各个供应链主体的各个合作模式当中, 新产品的市场需求量的大小比较  $q^{MRC^*} > q^{MR^*} > q^{MC^*} > q^{N^*}$ , 制造商与各个供应链主体的各个合作模式当中新产品的市场销售价格的大小比较为  $p^{N^*} > p^{MC^*} > p^{MR^*} > p^{MRC^*}$ 。

$$q^{MCR^*} - q^{MR^*} = \frac{k(\delta\theta + \Delta)^2(1 - c_m)}{(-\delta^2\theta^2 - 2\Delta\delta\theta - \Delta^2 + 2k)(-3\delta^2\theta^2 - 6\Delta\delta\theta - 3\Delta^2 + 8k)}$$

$$q^{MR^*} - q^{MC^*} = \frac{k(c_m - 1)(\delta^2\theta^2 + 2\Delta\delta\theta + \Delta^2 - 8k)}{(3\delta^2\theta^2 + 6\Delta\delta\theta + 3\Delta^2 - 8k)(\delta^2\theta^2 + 2\Delta\delta\theta + \Delta^2 - 4k)}$$

$$q^{MC^*} - q^{N^*} = -\frac{k(\delta\theta + \Delta)^2(c_m - 1)}{(-3\delta^2\theta^2 - 6\Delta\delta\theta - 3\Delta^2 + 16k)(-\delta^2\theta^2 - 2\Delta\delta\theta - \Delta^2 + 4k)}$$

由  $k > \frac{3(\Delta + \theta\delta)^2}{16}$  且  $k > k_0$ , 易得到  $q^{MRC^*} > q^{MR^*} > q^{MC^*} > q^{N^*}$ , 同理, 零售价格大小的比较与需求量的比较类似, 本文不在阐述。

由命题3可以得到, 在制造商与供应链主体的各个合作模式当中, 新产品的市场需求量和新产品的市场销售价格与分类回收努力系数和分类回收收益系数无关, 同时, 可以看到当制造商选择 MCR 合作模式时, 新产品的市场需求量最高, 当制造商选择不同其他主体合作时, 新产品的市场需求量最低, 这是由于当制造商选择与回收商和零售商一起进行合作时, 供应链当中的各个主体之间的竞争程度达到最低水平, 避免了双重边际效应, 制造商与零售商能够合理的安排产品的销售价格, 以保证最大的收益, 因此此时的新产品的市场需求量最大, 相反, 供应链当中不存在合作模式时, 各个供应链主体都会选择对自己的收益最优的策略, 这就导致竞争力加大, 增加了产品的销售价格, 从而导致新产品的市场需求量降低。

同时, 当制造商与零售商进行合作时, 其新产品的市场需求和市场销售价格要更优于制造商与回收商进行合作所制定的新产品销售价格, 这是当制造商与零售商进行合作时, 两者对新产品的供应链方面所带来的效益要大于制造商与回收商进行合作时的效益, 虽然制造商与回收商合作能通过废旧产品的分类和分解来降低制造费用, 但仍然不如 MR 模式当中制造商与零售商竞争程度降低所带来的效益。

### 命题4: 旧产品总回收率( $\tau = \tau_r + \tau_c$ )的大小关系

各合作策略中旧产品总回收率大小的关系为  $\tau^{MRC^*} > \tau^{MR^*} > \tau^{MT^*} > \tau^{N^*}$ 。证明如下:

$$\tau^{MRC^*} - \tau^{MR^*} = -\frac{10(\delta\theta + \Delta)(c_m - 1)k}{(\delta^2\theta^2 + 2\Delta\delta\theta + \Delta^2 - 2k)(3\delta^2\theta^2 + 6\Delta\delta\theta + 3\Delta^2 - 16k)}$$

$$\tau^{MR^*} - \tau^{MC^*} = -\frac{4(\delta\theta + \Delta)(c_m - 1)k}{(3\delta^2\theta^2 + 6\Delta\delta\theta + 3\Delta^2 - 8k)(\delta^2\theta^2 + 2\Delta\delta\theta + \Delta^2 - 4k)}$$

$$\tau^{MC^*} - \tau^{N^*} = -\frac{4(\delta\theta + \Delta)(c_m - 1)k}{(3\delta^2\theta^2 + 6\Delta\delta\theta + 3\Delta^2 - 16k)(\delta^2\theta^2 + 2\Delta\delta\theta + \Delta^2 - 4k)}$$

其中，在供应链当中各个主体都进行合作的模式下，废旧产品的回收率最高，相反，当供应链所有成员均不合作时，废旧产品总回收率最低。这是由于当供应链当中各个主体都进行合作时，此时它们以整体的供应链最优为目标，各个主体之间竞争程度处于最低水平，因此此时的废旧产品回收率最高，当供应链当中各个成员都不选择合作时，此时的竞争程度处于最高水平，每个主体都以自身的最优利益做决策，因此此时的废旧产品的总回收率在四个模型中处于最低水平。

若制造商与回收商签署合作协议，合作策略 MC 中的回收率则高于合作策略 N。这表明合作策略 MC 在促进回收方面更为有效，因为协同合作可以带来更高的旧产品回收率，与相对独立决策相比，合作协议有助于最大程度地实现回收目标。

**命题 5：**制造商对制造商、回收商合作模式的合作偏好

- 1) 制造商更加偏好与回收商组成合作组织， $\pi_{m+c}^{MC^*} - \pi_m^{N^*} - \pi_c^{N^*} > 0$
- 2) 制造商和回收商组成的合作组织能够提高零售商的收益，即  $\pi_r^{MC^*} > \pi_r^{N^*}$

证明：

$$\begin{aligned}\pi_{m+c}^{MC^*} - \pi_m^{N^*} - \pi_c^{N^*} &= \frac{k(c_m - 1)^2 (\delta\theta + \Delta)^2 (\delta^2\theta^2 + 2\Delta\delta\theta + \Delta^2 - 8k)}{2(\delta^2\theta^2 + 2\Delta\delta\theta + \Delta^2 - 4k)(3\delta^2\theta^2 + 6\Delta\delta\theta + 3\Delta^2 - 16k)^2} \\ \pi_r^{MC^*} - \pi_r^{N^*} &= \frac{k^2(c_m - 1)^2 (\delta\theta + \Delta)^2 (-7\delta^2\theta^2 - 14\Delta\delta\theta - 7\Delta^2 + 32k)}{(-\delta^2\theta^2 - 2\Delta\delta\theta - \Delta^2 + 4k)^2 (-3\delta^2\theta^2 - 6\Delta\delta\theta - 3\Delta^2 + 16k)^2}\end{aligned}$$

将制造商与回收商的合作模式 MC 与两者均不合作模式 N 中制造商和回收商的总收益相减，将制造商与回收商的合作模式 MC 与两者均不合作模式 N 中的零售商收益作差，可得上述两式，因为由  $k > \frac{3(\Delta + \theta\delta)^2}{16}$  且  $k > k_0$ ，易得到  $\pi_{m+c}^{MC^*} - \pi_m^{N^*} - \pi_c^{N^*} > 0$ ， $\pi_r^{MC^*} > \pi_r^{N^*}$ 。

**命题 5** 说明制造商为了获得更高的收益，有一定的动机与回收商组成合作联盟。当两者不选择合作时，两者都为了自身的最大收益而选择最优的策略，制造商选择对其收益最大的回收价格，回收商选择收益最大回收率，导致两者之间的双重边际效应增大，加剧了竞争，同时也降低了两者的收益。同时，当制造商与回收商进行合作时，零售商也能够因为这种合作模式而获得较高的收益水平，这是由于当制造商选择制造商与回收商的合作模式时，因为竞争降低，制造商因为从回收商的回收渠道中获得了较多的废旧产品，降低了生产成本，因此批发价格也会降低，随后零售商也能设定较低销售价格，增加了销量。

**命题 6：**制造商对制造商、零售商的合作模式的偏好

- 1) 制造商更加偏好与零售商组成合作组织，即  $\pi_{m+r}^{MR^*} - \pi_m^{N^*} - \pi_r^{N^*} > 0$
- 2) 制造商和零售商组成的合作组织能够提高回收商的收益，即  $\pi_c^{MR^*} > \pi_c^{N^*}$

证明：

$$\begin{aligned}\pi_{m+r}^{MR^*} - \pi_m^{N^*} - \pi_r^{N^*} &= \frac{128k^3(c_m - 1)^2}{(-3\delta^2\theta^2 - 6\Delta\delta\theta - 3\Delta^2 + 8k)(-3\delta^2\theta^2 - 6\Delta\delta\theta - 3\Delta^2 + 16k)^2} \\ \pi_c^{MR^*} - \pi_c^{N^*} &= -\frac{48(\delta\theta + \Delta)^2 k^2 (c_m - 1)^2 (\delta^2\theta^2 + 2\Delta\delta\theta + \Delta^2 - 4k)}{(3\delta^2\theta^2 + 6\Delta\delta\theta + 3\Delta^2 - 8k)^2 (3\delta^2\theta^2 + 6\Delta\delta\theta + 3\Delta^2 - 16k)^2}\end{aligned}$$

将制造商与零售商的合作模式 MR 与两者均不合作模式 N 中制造商、零售商的总收益相减，同时将合作模式 MR 与合作模式 N 中的回收商收益相减，可得上述两式，根据  $k > \frac{3(\Delta + \theta\delta)^2}{16}$  且  $k > k_0$ ，易得到

$$\pi_{m+r}^{MR*} - \pi_m^{N*} - \pi_r^{N*} > 0, \quad \pi_c^{MR*} > \pi_c^{N*}.$$

**命题 6** 说明制造商为了获得更高的收益，有一定的动机与零售商组成合作联盟。当两者不选择合作时，两者都为了自身的最大收益而选择最优的策略，这就导致两者的竞争加剧，双重边际效应对制造商和零售商产生了不利的影响，当两者选择合作时，降低了两者之间的竞争程度，缓冲了两者不合作时所产生的双重边际效应，提高了制造商和零售商的收益。同时，当制造商与零售商进行合作时，回收商的收益也会随着两者的合作而获得提高，这是由于当制造商与零售商进行合作时，两者合作模式能够提高新产品的市场需求和销量，这就导致有更多的旧产品的流入到回收商的回收渠道当中。

#### 命题 7：制造商合作倾向

当回收分类收益较大时，即  $\delta$  较大时， $\pi_{m+c}^{MC*} - \pi_m^{N*} - \pi_c^{N*} > \pi_{m+r}^{MR*} - \pi_m^{N*} - \pi_r^{N*}$

当回收分类收益较小时，即  $\delta$  较小时， $\pi_{m+c}^{MC*} - \pi_m^{N*} - \pi_c^{N*} \leq \pi_{m+r}^{MR*} - \pi_m^{N*} - \pi_r^{N*}$

证明：将制造商仅与回收商进行合作时相较于不合作所增加的收益与制造商仅与零售商进行合作时所增加的收益相减可得：

$$\begin{aligned} & \pi_{m+c}^{MC*} - \pi_m^{N*} - \pi_c^{N*} - (\pi_{m+r}^{MR*} + \pi_m^{N*} + \pi_r^{N*}) \\ &= \frac{512k(c_m - 1)^2 Z_1}{(-3\delta^2\theta^2 - 6\Delta\delta\theta - 3\Delta^2 + 8k)(-3\delta^2\theta^2 - 6\Delta\delta\theta - 3\Delta^2 + 16k)^2(-\delta^2\theta^2 - 2\Delta\delta\theta - \Delta^2 + 4k)} \end{aligned}$$

其中

$$Z_1 = \frac{5\left(\frac{9}{64}\Delta^4 - \frac{3}{5}k\Delta^2 + k^2\right)\theta^2\delta^2}{16} - \frac{5\Delta\left(\frac{9}{320}\Delta^4 - \frac{1}{5}k\Delta^2 + k^2\right)\theta\delta}{8} - \frac{3\Delta^6}{1024} + \frac{\Delta^4k}{32} - \frac{5\Delta^2k^2}{16} + k^3$$

由此可以得到上式时关于  $\delta$  二次函数，因为则存在两个点  $\delta_1, \delta_2$  使的上述函数等于 0，当  $\delta > \max(\delta_1, \delta_2)$  时， $\pi_{m+c}^{MC*} - \pi_m^{N*} - \pi_c^{N*} > \pi_{m+r}^{MR*} - \pi_m^{N*} - \pi_r^{N*}$ ，反之， $\pi_{m+c}^{MC*} - \pi_m^{N*} - \pi_c^{N*} \leq \pi_{m+r}^{MR*} - \pi_m^{N*} - \pi_r^{N*}$ 。

**命题 7** 指出，制造商只与回收商(MC)或零售商(MR)合作的偏好会受到回收分类收益系数的影响。当分类回收系数处于较低水平时，制造商更偏好与零售商组成合作组织。这是因为制造商与零售商组成的合作组织能够降低产品的零售价格，增加产品的零售销量，同时制造商获取了更高的收益，能够增加对废旧垃圾产品的分类回收的投入。随着回收分类收入系数的增加，制造商为了获得更高的分类回收收益，制造商将提高废旧产品的转移支付系数，此时制造商和回收商的合作组织能够获得更高的废旧产品分类回收收益，降低新产品的生产成本，此时因分类回收所带来的收益大于增加零售销量所带来的收益，因此当分类回收收益较大时，制造商更偏好与回收商组成合作组织。

#### 命题 8：不同合作策略对供应链利润的影响

当回收分类收益较大时，即  $\delta$  大于时  $\max(\delta_3, \delta_4)$ ，各合作策略中供应链利润大小为：

$\pi_S^{N*} < \pi_S^{MC*} < \pi_S^{MR*} < \pi_S^{MRC*}$ ，当回收分类收益较大时，反之， $\pi_S^{N*} < \pi_S^{MR*} < \pi_S^{MC*} < \pi_S^{MRC*}$ 。其中  $\delta_3, \delta_4$  是  $Z_2 = \frac{\theta^2\left(\frac{15}{64}\Delta^4 - \frac{15}{16}\Delta^2k + k^2\right)\delta^2}{2} - \left(\frac{3}{64}\Delta^4 - \frac{5}{16}\Delta^2k + k^2\right)\theta\Delta\delta - \frac{\Delta^6}{128} + \frac{5\Delta^4k}{64} - \frac{\Delta^2k^2}{2} + k^3$  是使得等于 0 解。证明与命题 6 的类似。

**命题 8** 说明在 N、MR、MC、MCR 四种合作模式下，当三者都不进行合作时的供应链总利润最小，

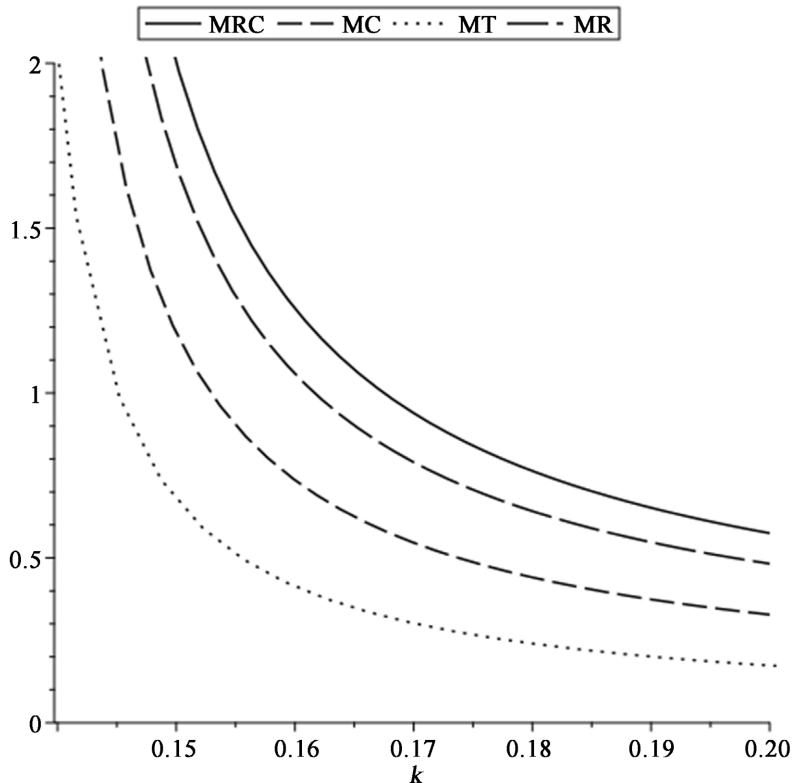
这是由于当所有主体选择不进行合作(N)时，供应链各主体之间的竞争极大，废旧产品的回收数量较低，新产品的市场需求量较低，因此整体供应链的最低；

当制造商、零售商和回收商三个主体选择共同合作即 MCR 模式时，旧产品总回收数量和新产品市场需求量达到最高水平，零售商制定的产品零售价格处于最低水平，即供应链各主体成员之间的利益冲突和相互竞争得到了有效的协调，因此此时供应链的总体收益较高最高。同时，制造商选择与零售商进行合作还是与回收商进行合作与回收分类收益相关，当回收分类收益较大时，制造商更加偏向于回收商进行合作，这是由于与回收商进行合作时，由分解废旧产品所降低的成本大于与零售商进行合作时所产生的收益，整体的供应链由于回收率的提高能够获得较高的收益，相反，当回收收益较低时，整体供应链的收益水平受新产品的销售需求的影响大于废旧产品回收率的影响，因此当回收收益系数较高时，制造商更偏好与回收商进行合作，当回收收益系数较低时，制造商更偏好于零售商进行合作。

## 5. 算例分析

本章内容将用算例分析的方法对上述的结论进行佐证，本节将通过数值仿真进一步揭示模型的管理与实践意义。首先，分析回收成本系数  $k$  对逆向供应链总体的利润的影响；其次，进一步分析分类回收努力程度及收益系数对逆向供应链最优解的影响；最后，验证回收商共谋策略的有效性。

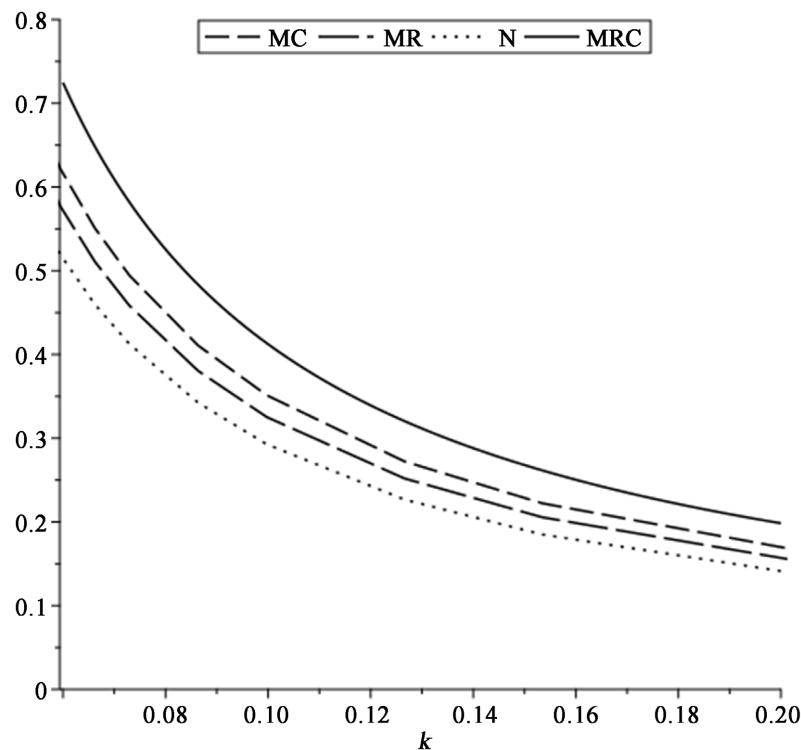
参数设置应满足理论模型中假设条件，在参考文献[8][9]后，令  $\Delta = 0.02$ ， $c_m = 0.1$ ， $g = 1$ ， $\theta = 0.3$ ，在计算  $k$  对整体供应链利润的影响时，设  $\delta = 0.5$ 。在计算  $\delta$  的影响时，令  $k = 0.16$ 。



**Figure 5.** Impact of  $k$  on the overall supply chain  
图 5.  $k$  对总体供应链的影响

由图 5 可得，随着  $k$  的增大，各个模型的整体供应链利润函数呈下降趋势，这是因为制造商和回收

商的回收成本提高，导致产品的利润下降，而回收分类收益又较少，导致整体的利润下降，同时，在 $\delta$ 较小时，通过利润图可以发现，合作策略 MR 的整体收益要大于合作策略 MC 的整体收益，这是由于此时的制造商与零售商联盟所增加的产品需求量相较于 MC 模式的回收分类收益仍然占优，故此时制造商倾向与零售商合作。



**Figure 6.** Impact of  $k$  on total recovery rate  $\tau$

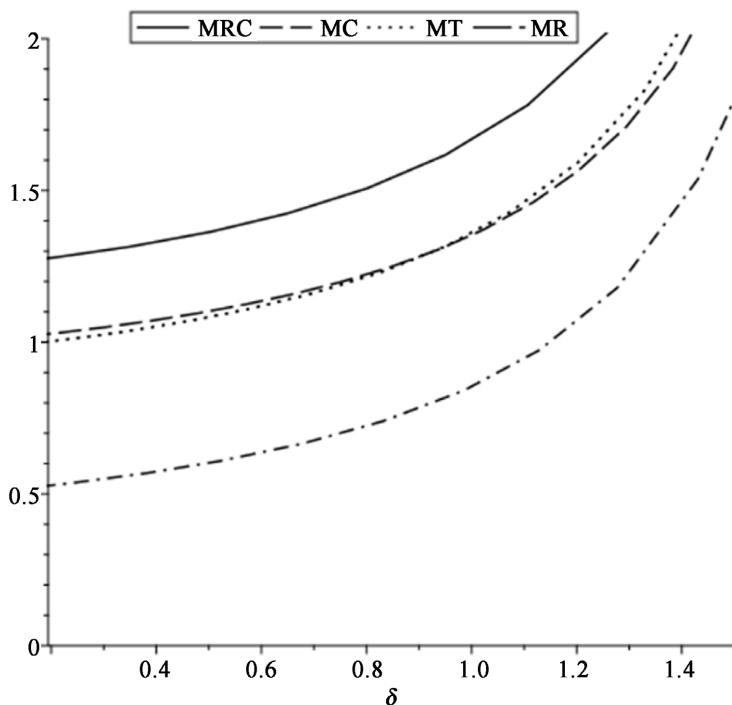
**图 6.**  $k$  对总回收率  $\tau$  的影响

由图 6 可以看出，在所有的模式下，回收成本的增加会降低废旧产品的回收率，同时也可得出当供应链当中各个成员都进行合作时的废旧产品的总回收率在四个模型中最高，制造商仅与回收商进行合作率高于制造商与零售商进行合作的回收率，供应链当中各个成员都不进行合作时的回收率最低。

由图 7 可得，随着 $\delta$ 的增大，所有合作策略包括 N, MC, MRC, MT 的利润都在增长，这表明当制造商作为供应链的主导者时，通过回收分类所获取的收益能够补充到零售商和回收商等下游供应链当中，提高供应链总体的收益水平，同时通过上图可以看到当 $\delta$ 增大到一定程度时，合作模式 MT 的总体收益要大于合作模式 MR，这验证了本文命题 8 的结论。

## 6. 小结

本文研究了回收分类的收益系数和分类回收努力程度以及其他参数对对混合回收逆向供应链当中制造商合作策略选择的影响。本文构建了四种合作策略，包括制造商仅与零售商合作(MR)、制造商仅与回收商合作(MC)、制造商与零售商和回收商合作(MCR)以及制造商不与两者合作(N)。通过逆向归纳法和斯坦伯格博弈理论对四个模型进行了分析，结果表明，随着回收成本的增加，供应链整体收入水平下降，同时各实体的收入也随之下降。各合作策略中产品零售价格和需求量的大小关系与回收努力程度和回报无关，全部合作的批发价格最低，其次是制造商与零售商模式，在次是制造商与回收商合作模式，



**Figure 7.** The impact of  $\delta$  on the total profit of the supply chain  
**图 7.**  $\delta$  对供应链总利润的影响

无合作模式批发价格最高。供应链成员全部合作模式的废旧产品的总回收率最高；而供应链各成员全不合作时废旧产品总回收率最低。制造商与回收商的合作能够增加制造商和回收商的收益水平，同时该合作模式也会使零售商获得较高的收益。制造商与零售商合作能够增加制造商和零售商的收益水平，同时制造商和零售商合作有利于增加回收商利润，当回收收益较大时，制造商会更加倾向于同回收商合作，当回收收益较低时，制造商偏好与零售商建立合作组织。同时，整体供应链的收益水平受分类回收收益系数的影响，当分类回收收益系数较高时，制造商与单独回收商进行合作时的整体供应链收益水平大于制造�单独与零售商进行合作时的整体供应链收益水平，反之，当分类回收收益系数较低时，制造�单独与零售商的整体供应链收益水平较高。

## 参考文献

- [1] Wang, K.Z., Zhao, Y.X., Cheng, Y.H. and Choi, T.-M. (2014) Cooperation or Competition? Channel Choice for a Re-manufacturing Fashion Supply Chain with Government Subsidy. *Sustainability*, **6**, 7292-7310.  
<https://doi.org/10.3390/su6107292>
- [2] Xie, J., Liang, L. and Liu, L. (2017) Coordination Contracts of Dual-Channel with Cooperation Advertising in Closed-Loop Supply Chains. *International Journal of Production Economics*, **183**, 528-538.  
<https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2016.07.026>
- [3] Zhang, Z., Liu, S. and Niu, B. (2020) Coordination Mechanism of Dual-Channel Closed-Loop Supply Chains Considering Product Quality and Return. *Journal of Cleaner Production*, **248**, Article ID: 119273.  
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119273>
- [4] Zhao, J., Wei, J. and Sun, X. (2017) Coordination of Fuzzy Closed-Loop Supply Chain with Price Dependent Demand Under Symmetric and Asymmetric Information Conditions. *Annals of Operations Research*, **257**, 469-489.  
<https://doi.org/10.1007/s10479-016-2123-6>
- [5] Aydin, R., Kwong, C.K. and Ji, P. (2016) Coordination of the Closed-Loop Supply Chain for Product Line Design with Consideration of Remanufactured Products. *Journal of Cleaner Production*, **114**, 286-298.  
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.05.116>

- 
- [6] Jian, J., Li, B. and Zhang, N. (2021) Decision-Making and Coordination of Green Closed-Loop Supply Chain with Fairness Concern. *Journal of Cleaner Production*, **298**, Article ID: 126779.  
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126779>
  - [7] Ji, P., Ma, X. and Li, G. (2015) Developing Green Purchasing Relationships for the Manufacturing Industry: An Evolutionary Game Theory Perspective. *International Journal of Production Economics*, **166**, 155-162.  
<https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2014.10.009>
  - [8] Saha, S., Sarmah, S.P. and Moon, I. (2016) Dual Channel Closed-Loop Supply Chain Coordination with a Reward-Driven Remanufacturing Policy. *International Journal of Production Research*, **54**, 1503-1517.  
<https://doi.org/10.1080/00207543.2015.1090031>
  - [9] Huang, Z., Nie, J. and Tsai, S.B. (2017) Dynamic Collection Strategy and Coordination of a Remanufacturing Closed-Loop Supply Chain under Uncertainty. *Sustainability*, **9**, Article No. 683. <https://doi.org/10.3390/su9050683>
  - [10] 孙嘉轶, 邵天琳, 滕春贤. 回收竞争下闭环供应链分类回收及共谋策略研究[J/OL]. 计算机集成制造系统: 1-25. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.5946.TP.20231024.0849.002.html>, 2023-12-24.
  - [11] 王陈轶.“双碳”背景下城市居民低价值可回收物分类行为研究[J]. 物流科技, 2023, 46(20): 46-49.  
<https://doi.org/10.13714/j.cnki.1002-3100.2023.20.011>
  - [12] 巫瑞, 夏西强, 黄兆涵. 政府奖惩机制对废旧产品行业分类回收影响及协调机制研究[J]. 工业技术经济, 2023, 42(7): 143-152.
  - [13] 夏西强, 路梦圆, 陈彪, 等. 分类回收费用承担模式对回收渠道影响及协调机制研究[J/OL]. 中国管理科学: 1-12. <https://doi.org/10.16381/j.cnki.issn1003-207x.2022.0881>, 2023-12-24.
  - [14] 李飚, 夏西强, 赵强. 博弈视角下分类回收对废旧产品回收影响研究[J]. 中国管理科学, 2023, 31(8): 261-268.  
<https://doi.org/10.16381/j.cnki.issn1003-207x.2021.0261>
  - [15] 赵强, 夏西强, 李炜洁. 分类回收下政府补贴对废旧产品回收影响研究[J]. 工业技术经济, 2021, 40(7): 51-56.
  - [16] 赵忠, 谢家平, 任毅. 废旧产品回收再制造计划模式研究述评[J]. 管理学报, 2008, 5(2): 305-311.
  - [17] Wu, X. and Zhou, Y. (2017) The Optimal Reverse Channel Choice under Supply Chain Competition. *European Journal of Operational Research*, **259**, 63-66. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2016.09.027>