

# Nash Game in a Two-Period Closed-Loop Supply Chain with Reference Price Effect

Hao Sun, Zhuang Sui

School of Business, Qingdao University, Qingdao Shandong  
Email: rivaldoking@126.com, 547282207@qq.com

Received: Jun. 4<sup>th</sup>, 2019; accepted: Jun. 17<sup>th</sup>, 2019; published: Jun. 24<sup>th</sup>, 2019

---

## Abstract

Nash game models in a two-period closed-loop supply chain (CLSC) system with reference price effect are established under three different kinds of collection modes respectively: manufacturer-collection, retailer-collection and third-party-collection. The equilibrium prices, collection rates and channel member profits under three modes are derived and compared. Then the impacts of reference price effect on CLSC are analyzed. The conclusions show that: manufacturer-collection mode can maximize the environmental performance and the total profit of CLSC, but the manufacturer cannot realize his own profit maximization. The comparison between retailer-collection and third-party-collection depends on the collection subsidy rate. The reference price effect has a positive impact on the first-period price and the second-period demand in all three modes, while its impact on the second-period price depends upon the collection scale parameter. The increase of the reference price effect discourages the collection enthusiasm of the collector. All the channel members can benefit from the reference price effect.

## Keywords

Two-Period, Closed Loop Supply Chain, Nash Equilibrium, Reference Price Effect

---

# 考虑参考价格效应的两期闭环供应链Nash均衡博弈

孙浩, 隋壮

青岛大学商学院, 山东 青岛  
Email: rivaldoking@126.com, 547282207@qq.com

## 摘要

分别针对制造商回收、零售商回收和第三方回收的三种回收模式, 在制造商与零售商Nash均衡博弈情形下构建了基于参考价格效应的两期闭环供应链博弈模型, 经求解和比较得到不同回收模式的均衡定价、回收率以及成员利润的数量关系, 进而分析参考价格效应产生的影响。研究表明: 制造商回收模式能实现最优的环保绩效与系统总利润, 但该模式下的制造商利润却非最优; 零售商回收与第三方回收的优劣取决于回收补贴率; 随着参考价格效应的增加, 第一期价格和第二期销量提高, 第二期价格的增减取决于回收规模参数; 回收方的回收动机受到抑制, 但所有成员均能从参考价格效应中获益。

## 关键词

两周期, 闭环供应链, Nash均衡, 参考价格效应

Copyright © 2019 by author(s) and Hans Publishers Inc.

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

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



Open Access

## 1. 引言

闭环供应链由传统正向供应链与回收再制造等逆向物流活动整合而成, 其经济效益和环保价值已得到政府、企业及消费者等利益相关者的高度认可。适用于回收再制造的产品主要包括各种工程机械类产品、汽车轮胎及零配件以及各种高科技含量的电子产品等, 其中某些产品的核心部件能够被多次再制造, 如汽车轮胎的外胎和计算机芯片可分别被再制造3次和4次[1][2]。故对制造商而言, 如何从多周期动态视角制定产品动态定价和生产再制造策略是其面临的关键问题之一。在学界已有诸多文献围绕该问题展开探讨, 如 Ferrer 和 Swaminathan 分别探究了垄断厂商两周期、有限多周期和无穷期的新产品与再制造产品均一化定价、差异化定价与批量决策[3][4]。Bulmus 等以汽车行业为例, 探究了两周期混合制造/再制造系统的产能分配与生产再制造决策[5]。Chen 和 Chang 提出一种新型的拉格朗日松弛与动态规划算法求解有限多周期闭环供应链动态定价问题[6]。De Giovanni 和 Zaccour 在两周期环境下分析了制造商应将回收业务外包抑或自营的决策问题[7]。李琰等在“互联网+”背景下研究了多周期闭环供应链的产品定价、再制造与广告投入策略[8]。

尽管上述文献可为现实中的企业运营提供决策依据, 但其均忽视了多周期环境下消费者对产品动态定价的心理认知。而实验经济学与心理学的研究充分表明: 在消费者的实际购买过程中, 其通常会当前产品价格与内心的“参考价格”进行比较, 然后做出购买决策。具体地, 若当前价格超过参考价格, 消费者认为它“昂贵”, 反之则认为“便宜”[9]。Kalyanaram 和 Winer 验证了参考价格效应对需求的影响具有一致性和显著性, 且参考价格的形成与演化过程依赖于产品历史定价[10]。在运作管理领域, Popescu 和 Wu 探讨了基于参考价格效应的垄断厂商动态定价策略。研究表明: 当消费者风险中性时, 从长期视角厂商应采取价格递减的撇脂性定价策略; 而当消费者损失厌恶时, 最优价格将收敛于某一恒定

的稳态价格[11]。Ahn 等构建了垄断厂商的联合生产与动态定价决策模型, 其中每周期市场需求依赖于本期价格与过去两期的价格[12]。Guler 等研究了具有参考价格效应的单产品周期性盘点的联合补货与动态定价问题[13] [14]。Maiti 和 Giri 探究了不同批发价模式下考虑参考价格效应的两周期供应链定价博弈均衡[15]。楼高翔等分析了具有参考价格效应的企业动态定价与碳减排决策[16]。在闭环供应链领域, 皮德萍等提出了基于参考价格效应的闭环供应链收益共享协调机制, 其中消费者对产品的销售价格与回收价格均已形成内生的参考价格[17]。Xu 等比较了参考价格影响下制造商回收、零售商回收和第三方回收的闭环供应链定价策略和回收效率[18]。但文献[17] [18]均局限于单周期环境, 且参考价格是预先给定的外生常量, 未体现出决策动态性的特点。

与本文最接近的是笔者孙浩等[19]的研究, 其比较了具有参考价格效应的集中式和三种分散式回收模式的两周期闭环供应链定价策略和回收效率, 但其针对的是制造商作为渠道领导者的情况。然而, 随着当前零售业态的迅猛发展以及 O2O 等新零售模式的出现, 零售商在供应链中的话语权逐渐增强, 市场上零售商领导供应链或零售商与制造商权力对等的案例已较为普遍。故本文拟在双方同时决策的 Nash 均衡博弈下, 比较三种分散式回收模式的系统效率, 并指明其与制造商领导的均衡决策异同。

## 2. 模型假设和参数定义

### 2.1. 问题描述和相关假设

在两周期闭环供应链中, 第一期制造商和零售商分别从事新产品的生产和销售, 回收方(可能是制造商、零售商和第三方的任何一方)进行回收设施的投资建设; 第二期初, 回收方从消费者处回收旧产品, 并转卖给制造商实施再制造。制造商将新产品与再制造产品同时委托给零售商进行销售, 两种产品价值等同且采取均一化定价模式[7] [19] [20]。此外, 假定制造商和零售商在闭环供应链中的权力地位对等, 双方形成 Nash 均衡博弈, 各渠道成员均追求自身利润最大化。

### 2.2. 参变量说明

制造商的两期批发价分别记为  $w_1, w_2$ ; 零售商的两期零售价分别记为  $p_1, p_2$ ; 两期市场需求  $q_1, q_2$  是价格的确定函数, 具体形式分别为  $q_1(p_1) = \alpha - p_1$  和  $q_2(p_1, p_2) = \alpha - p_2 - \theta(p_2 - p_1)$ , 即第一期  $q_1$  与  $p_1$  线性负相关; 而在第二期  $q_2$  不仅与  $p_2$  负相关, 而且受参考价格效应的影响, 具体地, 消费者将  $p_1$  作为该期的参考价格, 当  $p_2 < p_1$  时, 消费者的盈利心理将使市场需求比无参考效应情形多; 反之当  $p_2 > p_1$  时, 消费者的亏损心理将使市场需求比无参考效应情形少, 其中  $\theta$  表示参考价格因子, 并满足  $0 \leq \theta < 1$ , 其意味着参考价格效应对市场需求的影响小于该期价格。

制造商两期的新品生产成本与旧品再制造成本分别记为  $c$  和  $c_r$ , 为确保再制造的经济价值, 应满足  $c_r < c$ ; 二者差值  $\Delta = c - c_r$  表示再制造成本节约水平; 第二期的旧品回收率(即第二期的旧品回收量占第一期新品销售量的比重)记为  $\tau$ ,  $0 \leq \tau \leq 1$ ; 回收方的回收设施固定投资记为  $I$ , 其与规模参数  $B$  和回收率  $\tau$  相关, 根据文献[20], 令  $I = B\tau^2/2$ 。回收方向消费者支付的单位回收费用记为  $g$ ; 在零售商或第三方回收模式中, 为保证回收方能从回收活动中获取收益, 制造商在单位回收成本基础上对其加成补贴, 相应补贴额为  $(1 + \mu)g$ , 其中  $\mu$  为补贴加成率[7] [19], 是制造商与回收方约定的外生常量, 主要取决于成员间的讨价还价能力。同样, 为保证制造商也从再制造中有利可图, 也应满足  $\Delta > (1 + \mu)g$ 。最后, 根据文献[19]对集中式决策下回收率低于 1 的限制, 限定规模参数:

$$B > \frac{2(1 + \theta)(\Delta - g)[\alpha - c + \Delta - g]}{4 + 4\theta - \theta^2}.$$

以下各变量的上标  $M$ 、 $R$  和  $T$  分别代表制造商回收、零售商回收和第三方回收的三种分散式回收模式, 下标由字母和数字组成, 分别对应于某渠道成员、某周期的决策变量或利润函数。

### 3. 不同回收模式下两期闭环供应链定价与生产再制造策略

#### 3.1. 制造商回收

在制造商回收模式下, 制造商承担新品生产与旧品的回收再制造工作, 零售商只进行产品销售, 双方利润函数如下:

$$\pi_M^M(w_1, w_2, \tau) = [(w_1 - c)q_1 - B\tau^2/2] + (w_2 - c)q_2 + (\Delta - g)\tau q_1 \quad (1)$$

$$\pi_R^M(p_1, p_2) = (p_1 - w_1)q_1 + (p_2 - w_2)q_2 \quad (2)$$

该 Nash 博弈分为两个周期进行: 第一周期, 制造商决定该期的产品批发价与回收率, 与此同时零售商确定该期零售价; 第二周期, 制造商确定当期产品批发价, 同时零售商确定当期零售价。采用逆序法求解该博弈模型。

第二周期: 制造商和零售商分别选择  $w_2^M$  和  $p_2^M$  以实现各自第二期利润最大化, 相应的利润函数分别如下:

$$\pi_{M2}^M(w_2) = (w_2 - c)[\alpha - p_2 - \theta(p_2 - p_1)] + (\Delta - g)\tau q_1 \quad (3)$$

$$\pi_{R2}^M(p_2) = (p_2 - w_2)[\alpha - p_2 - \theta(p_2 - p_1)] \quad (4)$$

为便于该 Nash 均衡博弈模型的求解, 引入  $p_2 = w_2 + m$  对式(3)予以替换, 其中  $m$  表示零售商的边际利润。联立  $\partial\pi_{M2}^M/\partial w_2^M = 0$  和  $\partial\pi_{R2}^M/\partial p_2^M = 0$  得到:

$$w_2^M(p_1^M) = \frac{\alpha + \theta p_1^M}{3(1 + \theta)} + \frac{2c}{3} \quad (5)$$

$$p_2^M(p_1^M) = \frac{2(\alpha + \theta p_1^M)}{3(1 + \theta)} + \frac{c}{3} \quad (6)$$

第一周期: 将式(5)和(6)反代入式(1)和(2)中, 同时联立  $\partial\pi_R^M/\partial p_1^M = 0$ 、 $\partial\pi_M^M/\partial w_1^M = 0$  和  $\partial\pi_M^M/\partial\tau^M = 0$  得:

$$p_1^{M*} = \alpha - \frac{(1 + \theta)\Lambda B}{XB - 9\Phi_M}$$

$$\tau^{M*} = \frac{(1 + \theta)(\Delta - g)\Lambda}{XB - 9\Phi_M}$$

$$w_1^{M*} = \frac{(9 - 2\theta)\alpha + 2\theta c}{9} - \frac{2(9 + 9\theta - \theta^2)\Lambda B}{9(XB - 9\Phi_M)}$$

其中  $X = 27 + 27\theta - 4\theta^2$ ,  $\Phi_M = (1 + \theta)(\Delta - g)^2$ ,  $\Lambda = (9 - 4\theta)(\alpha - c)$ 。然后可依次计算该模式下的其它变量均衡解, 具体如表 1 第 1 列所给出。

#### 3.2. 零售商回收

在零售商回收模式下, 制造商从事产品的生产和再制造业务, 而将旧品回收工作委托给零售商, 即此时零售商同时从事新品与再制造品的销售以及旧品回收。双方利润函数如下:

$$\pi_M^R(w_1, w_2) = (w_1 - c)q_1 + (w_2 - c)q_2 + [\Delta - (1 + \mu)g]\tau q_1 \quad (7)$$

$$\pi_R^R(p_1, p_2, \tau) = \left[ (p_1 - w_1)q_1 - B\tau^2/2 \right] + \left[ (p_2 - w_2)q_2 + \mu g \tau q_1 \right] \quad (8)$$

博弈同样经历两个周期, 且第二期的博弈过程与上述制造商回收模式完全相同, 故可在其基础上直接分析第一期的均衡决策, 即制造商确定  $w_1^R$ 、零售商确定  $p_1^R$  和  $\tau^R$  以实现各自的两期总利润最大化。通过联立  $\partial \pi_R^R / \partial p_1^R = 0$ ,  $\partial \pi_R^R / \partial \tau^R = 0$ ,  $\partial \pi_M^R / \partial w_1^R = 0$  知:

$$p_1^{R*} = \alpha - \frac{(1+\theta)\Lambda B}{XB - 9\Phi_R}$$

$$w_1^{R*} = \frac{(9-2\theta)\alpha + 2\theta c}{9} - \frac{\left[ 2(9+9\theta-\theta^2)B - 9(1+\theta)(\mu g)^2 \right] \Lambda}{9(XB - 9\Phi_R)}$$

$$\tau^{R*} = \frac{(1+\theta)\mu g \Lambda}{XB - 9\Phi_R}$$

其中  $\Phi_R = (1+\theta)\mu g(\Delta - g)$ 。然后依次可计算该模式下的其它变量均衡解, 具体如表 1 第 2 列所给出。

### 3.3. 第三方回收

在第三方回收模式下, 制造商从事产品的生产和再制造业务, 而将旧品回收工作委托给第三方, 零售商负责产品销售, 三方的两期总利润分别如下:

$$\pi_M^T(w_1, w_2) = (w_1 - c)q_1 + (w_2 - c)q_2 + [\Delta - (1+\mu)g]\tau q_1 \quad (9)$$

$$\pi_R^T(p_1, p_2) = (p_1 - w_1)q_1 + (p_2 - w_2)q_2 \quad (10)$$

$$\pi_T^T(\tau) = -B\tau^2/2 + \mu g \tau q_1 \quad (11)$$

此博弈模型分为三个阶段: 零售商与制造商第一期的定价决策对应于阶段一; 第三方的回收率决策对应于阶段二; 零售商与制造商的第二期定价决策对应于阶段三。同样采取逆序法求解。易知阶段三的均衡决策与制造商回收模式的第二期完全相同, 故可从阶段二开始。

阶段二: 第三方选择回收率  $\tau^T$  来最大化其两期利润, 通过  $\partial \pi_T^T / \partial \tau^T = 0$  知  $\tau^T = \mu g q_1 / B$ 。

阶段一: 在以上反应函数基础上, 制造商和零售商同时选择定价策略以实现各自两期总利润最优, 故通过联立  $\partial \pi_M^T / \partial w_1^T = 0$  和  $\partial \pi_R^T / \partial p_1^T = 0$  得:

$$w_1^{T*} = \frac{(9-2\theta)\alpha + 2\theta c}{9} - \frac{2(9+9\theta-\theta^2)\Lambda B}{9(XB - 9\Phi_T)}$$

$$p_1^{T*} = \alpha - \frac{(1+\theta)\Lambda B}{XB - 18\Phi_T}$$

其中  $\Phi_T = 2(1+\theta)\mu g[\Delta - (1+\mu)g]$ 。然后依次可计算该模式下的其它变量均衡解, 具体如表 1 第 3 列所给出。

## 4. 均衡解的性质及比较分析

**命题 1:** 三种分散式回收模式下的两期价格与需求量的比较关系为: 当  $\mu > (\Delta - g)/2g$  时,  $p_1^{M*} < p_1^{R*} < p_1^{T*}$ ,  $p_2^{M*} < p_2^{R*} < p_2^{T*}$ ,  $q_1^{M*} > q_1^{R*} > q_1^{T*}$ ,  $q_2^{M*} > q_2^{R*} > q_2^{T*}$ ; 相反当  $\mu \leq (\Delta - g)/2g$  时,  $p_1^{M*} < p_1^{T*} \leq p_1^{R*}$ ,  $p_2^{M*} < p_2^{T*} \leq p_2^{R*}$ ,  $q_1^{M*} > q_1^{T*} \geq q_1^{R*}$ ,  $q_2^{M*} > q_2^{R*} \geq q_2^{T*}$ 。

**Table 1.** Nash equilibrium solutions and member profits under three collection modes  
**表 1.** 三种回收模式下的 Nash 均衡解与成员利润

模式/最优解	M 模式	R 模式	T 模式
$p_1$	$\alpha - \frac{(1+\theta)\Lambda B}{XB - 9\Phi_M}$	$\alpha - \frac{(1+\theta)\Lambda B}{XB - 9\Phi_R}$	$\alpha - \frac{(1+\theta)\Lambda B}{XB - 18\Phi_T}$
$q_1$	$\frac{(1+\theta)\Lambda B}{XB - 9\Phi_M}$	$\frac{(1+\theta)\Lambda B}{XB - 9\Phi_R}$	$\frac{(1+\theta)\Lambda B}{XB - 18\Phi_T}$
$p_2$	$\frac{6\alpha[(3+2\theta)B - \Phi_M] + (ZB - 3\Phi_M)c}{XB - 9\Phi_M}$	$\frac{6\alpha[(3+2\theta)B - \Phi_R] + (ZB - 3\Phi_R)c}{XB - 9\Phi_R}$	$\frac{6\alpha[(3+2\theta)B - 2\Phi_T] + (ZB - 6\Phi_T)c}{XB - 18\Phi_T}$
$q_2$	$\frac{3(1+\theta)(\alpha - c)[(3+2\theta)B - \Phi_M]}{XB - 9\Phi_M}$	$\frac{3(1+\theta)(\alpha - c)[(3+2\theta)B - \Phi_R]}{XB - 9\Phi_R}$	$\frac{3(1+\theta)(\alpha - c)[(3+2\theta)B - 2\Phi_T]}{XB - 18\Phi_T}$
$\tau$	$\frac{(1+\theta)(\Delta - g)\Lambda}{XB - 9\Phi_M}$	$\frac{(1+\theta)\mu g \Lambda}{XB - 9\Phi_R}$	$\frac{(1+\theta)\mu g \Lambda}{XB - 18\Phi_T}$
$\Pi_M$	$\frac{(1+\theta)(\alpha - c)^2 [18\Phi_M^2 - 9(21+4\theta)\Phi_M B + 2YB^2]}{2[XB - 9\Phi_M]^2}$	$\frac{(1+\theta)(\alpha - c)^2 [9\Phi_R^2 - 2X\Phi_R B + YB^2]}{[XB - 9\Phi_R]^2}$	$\frac{(1+\theta)(\alpha - c)^2 [36\Phi_T^2 - 9(21+4\theta)\Phi_T B + B^2 Y]}{[XB - 18\Phi_T]^2}$
$\Pi_R$	$\frac{(1+\theta)(\alpha - c)^2 [9\Phi_M^2 + YB^2 - 2X\Phi_M B]}{(XB - 9\Phi_M)^2}$	$\frac{(1+\theta)(\alpha - c)^2 \{2(9\Phi_R^2 + YB^2) - (1+\theta)\mu g [4X(\Delta - g) + (9-4\theta)^2 \mu g] B\}}{2(XB - 9\Phi_R)^2}$	$\frac{(1+\theta)(\alpha - c)^2 [36\Phi_T^2 + YB^2 - 4X\Phi_T B]}{(XB - 18\Phi_T)^2}$
$\Pi_T$	/	/	$\frac{(1+\theta)^2 (\mu g)^2 \Lambda^2 B}{2(XB - 18\Phi_T)^2}$

$X = 27 + 27\theta - 4\theta^2$ ,  $Y = 162 + 171\theta - 8\theta^2$ ,  $Z = 9 + 15\theta - 4\theta^2$ ,  $\Lambda = (9 - 4\theta)(\alpha - c)$ ,  $\Phi_M = (1 + \theta)(\Delta - g)^2$ ,  $\Phi_R = (1 + \theta)\mu g(\Delta - g)$ ,  $\Phi_T = (1 + \theta)\mu g[\Delta - (1 + \mu)g]$ 。



命题 1 的结论表明: 在三种分散式回收模式下, 制造商自身从事回收时的两期价格均低于其它两种模式, 而产品销量均高于其它两种模式。这是因为自身回收可使制造商享有全部的再制造成本节约, 故其通过降低批发价的方式来引导零售商降低零售价从而形成较高的销量。零售商回收与第三方回收两种模式下的价格与销量取决于制造商的补贴加成率  $\mu$ , 当  $\mu$  大于阈值  $(\Delta - g)/2g$  时, 零售商能够从逆向回收中获得较多补贴, 故其愿意在正向渠道中降低两期零售价, 反之当  $\mu$  小于该阈值时, 零售商无法从回收中获得足够的补贴, 必然提高零售价以增加边际收益。

此外, 易知各种模式下第一期需求量的数量关系与价格关系相反, 但与直觉相悖的是, 零售商回收与第三方回收两种模式下第二期需求的关系与其价格关系相同, 这与无参考价格效应时的结论存在明显差异, 具体原因如下: 首先易验证各种回收模式下的第一期价格均高于第二期, 即零售商利用消费者的比价心理来形成较高的第二期需求量; 然后可知当  $\mu$  大于其阈值时, 尽管  $p_1^{T*} > p_1^{R*}$  且  $p_2^{T*} > p_2^{R*}$ , 但可证明  $\theta(p_1^{T*} - p_2^{T*}) - \theta(p_1^{R*} - p_2^{R*}) > p_2^{T*} - p_2^{R*}$ , 即第三方回收模式相比于零售商回收模式参考价格效应引发的需求增加量高于高价格导致的需求减少量, 故  $q_2^{T*} > q_2^{R*}$ 。同样也可分析  $\mu$  小于其阈值的情况, 限于篇幅不再给出。

**命题 2: 三种分散式回收模式下回收率数量关系为: 当  $\mu > (\Delta - g)/2g$  时,  $\tau^{M*} > \tau^{R*} > \tau^{T*}$ ; 相反当  $\mu \leq (\Delta - g)/2g$  时,  $\tau^{M*} > \tau^{T*} \geq \tau^{R*}$ 。**

命题 2 的结论表明: 在制造商回收模式下, 由于制造商能从回收再制造中获取最高的再制造成本节约, 故其回收积极性也最高; 而对于另两种模式, 当制造商给予回收方的回收补贴较高时, 零售商回收时能够产出较高的回收率, 反之则是第三方回收绩效更优。

**命题 3: 三种分散式回收模式下渠道成员与闭环供应链的利润关系为:  $\pi_M^{R*} > \pi_M^{M*} > \pi_M^{T*}$ ;  $\pi_R^{M*} > \pi_R^{T*} > \pi_R^{R*}$ ; 若  $\mu > (\Delta - g)/2g$ ,  $\pi^{M*} > \pi^{R*} > \pi^{T*}$ , 反之若  $\mu \leq (\Delta - g)/2g$ ,  $\pi^{M*} > \pi^{T*} \geq \pi^{R*}$ 。**

命题 3 的结论表明: 在制造商与零售商形成 Nash 均衡且具有参考价格效应情形下, 制造商更愿意委托零售商回收, 其次是自行回收, 最劣是第三方回收; 但零售商明显不具备从事回收的动力, 其更偏好于制造商回收甚至第三方回收; 从整条闭环供应链视角而言, 制造商回收能够产出更高的渠道总利润。进而综合命题 1 和命题 2 的结论可知: 尽管制造商回收时其自身利润非最优, 但对消费者、环境和闭环供应链系统均是最佳选择。其它两种模式下的渠道总利润取决于制造商提供的回收补贴率, 当回收补贴率较高时, 零售商回收时的渠道总利润优于第三方回收; 反之当回收补贴率较低时, 则是第三方回收的渠道总利润更优。

以上三个命题的结论与文献[19]制造商主导的情形存在明显的差异。

**命题 4: 三种回收模式下参考价格因子  $\theta$  对决策变量均衡解、成员利润以及系统总利润的影响如下:**

1)  $\partial p_1^{M*}/\partial\theta > 0$ ,  $\partial q_1^{M*}/\partial\theta < 0$ ,  $\partial q_2^{M*}/\partial\theta > 0$ ;  $\partial p_1^{R*}/\partial\theta > 0$ ,  $\partial q_1^{R*}/\partial\theta < 0$ ,  $\partial q_2^{R*}/\partial\theta > 0$ ;  $\partial p_1^{T*}/\partial\theta > 0$ ,  $\partial q_1^{T*}/\partial\theta < 0$ ,  $\partial q_2^{T*}/\partial\theta > 0$ ;

2) 当  $B > \kappa \cdot \Phi_M$  时,  $\partial p_2^{M*}/\partial\theta > 0$ , 反之当  $B \leq \kappa \cdot \Phi_M$  时,  $\partial p_2^{M*}/\partial\theta < 0$ ; 当  $B > \kappa \cdot \Phi_R$  时,  $\partial p_2^{R*}/\partial\theta > 0$ , 反之当  $B \leq \kappa \cdot \Phi_R$  时,  $\partial p_2^{R*}/\partial\theta < 0$ ; 当  $B > \kappa \cdot \Phi_T$  时,  $\partial p_2^{T*}/\partial\theta > 0$ , 反之当  $B \leq \kappa \cdot \Phi_T$  时,  $\partial p_2^{T*}/\partial\theta < 0$ 。

其中  $\kappa = \frac{9 - 8\theta - 4\theta^2}{(1 + \theta)(27 - 24\theta - 8\theta^2)}$ ;

3)  $\partial \tau^{M*}/\partial\theta < 0$ ,  $\partial \tau^{R*}/\partial\theta < 0$ ,  $\partial \tau^{T*}/\partial\theta < 0$ ;

4)  $\partial \pi_M^{M*}/\partial\theta > 0$ ,  $\partial \pi_R^{M*}/\partial\theta > 0$ ,  $\partial \pi^{M*}/\partial\theta > 0$ ;  $\partial \pi_M^{R*}/\partial\theta > 0$ ,  $\partial \pi_R^{R*}/\partial\theta > 0$ ,  $\partial \pi^{R*}/\partial\theta > 0$ ;  $\partial \pi_M^{T*}/\partial\theta > 0$ ,  $\partial \pi_R^{T*}/\partial\theta > 0$ ,  $\partial \pi^{T*}/\partial\theta > 0$ 。

命题 4(1)表明: 在三种分散式回收模式下, 随着参考价格因子  $\theta$  的增加, 第一期的产品售价和销量分别提高和降低, 第二期的需求量均增加。零售商适当提高第一期价格, 其主要目的是与第二期产生足

够的价差, 从而充分利用参考价格效应来形成较多的第二期需求量。因此, 尽管第一期的销量降低导致其利润亏损, 但却能够通过第二期予以有效补偿, 最终有助于零售商两期总利润的提升。命题 4(2)表明在三种回收模式下均存在设施规模参数的某一阈值, 其为  $\theta$  的函数, 当  $B$  超出该阈值时, 第二期的产品售价随  $\theta$  而增加, 反之则随  $\theta$  而降低。其含义为当回收难度较低时, 第一期回收的旧品相对较多, 致使第二期的再制品与新产品总量较大, 又考虑到第二期为最后一期, 所有产成品均将全部售出, 故零售商将进一步调低零售价; 相反当回收难度较高时, 两期产成品总量相对较少, 故零售商于第二期将制定较高价格。但如前所述, 尽管第二期零售价随  $\theta$  增加, 但两期价差仍在持续拉大, 从而保证了该期的销量。该结论与文献[19]制造商主导情形的第二期产品价格始终随参考效应降低存在一定差异。

下面以制造商回收模式为例, 进一步结合规模参数  $B$  的取值分析参考价格因子  $\theta$  对第二期价格  $p_2^{M*}$  的影响, 由假设知:

$$B > \frac{2(1+\theta)(\Delta-g)[\alpha-c+\Delta-g]}{4+4\theta-\theta^2} > \frac{2\Phi_M}{4+4\theta-\theta^2}$$

故当  $2/(4+4\theta-\theta^2) > \kappa$  时,  $\partial p_2^{M*}/\partial\theta > 0$  必然成立。绘制函数  $F(\theta) = 2/(4+4\theta-\theta^2) - \kappa$  的图像得到图 1。

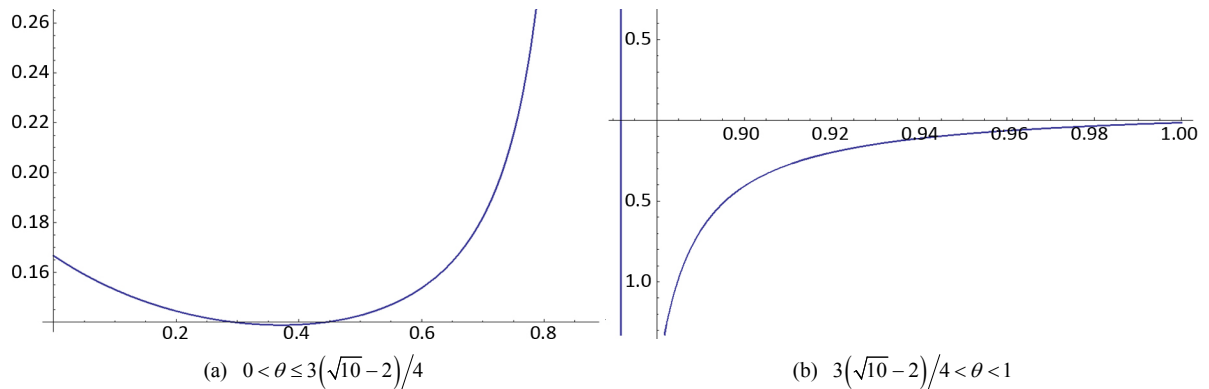


Figure 1. The image of the function  $F(\theta)$  in  $\theta \in (0,1)$  interval

图 1.  $\theta \in (0,1)$  区间内的函数  $F(\theta)$  图像

由图 1 图像可知, 当  $0 < \theta \leq 3(\sqrt{10}-2)/4 \approx 0.872$  时,  $F(\theta) > 0$ , 即  $\partial p_2^{M*}/\partial\theta > 0$  恒成立; 而当  $3(\sqrt{10}-2)/4 < \theta < 1$  时,  $F(\theta) < 0$ , 无法判定  $\partial p_2^{M*}/\partial\theta$  正负。因此, 当参考价格效应不是特别显著时, 第二期价格  $p_2^{M*}$  随  $\theta$  增加; 相反当参考价格效应特别显著时,  $p_2^{M*}$  随  $\theta$  的变化趋势依赖于  $B$  的取值。类似也可分析其他两种模式。

命题 4(3)和命题 4(4)表明: 在三种分散式回收模式下, 当参考价格效应显著时, 各渠道成员仅需利用该效应即可形成较高的销量和利润, 此时回收方继续提高回收率而增加的成本投入超过了其能够产生的利润增量, 故回收方的回收积极性受到抑制。然而, 所有渠道成员和闭环供应链均能从参考价格效应中获益, 在一定程度上克服了分散式供应链固有的双重边际效应和效益损失。该结论与文献[19]制造商主导情形相同。

### 5. 结束语

本文在制造商与零售商 Nash 均衡博弈情形下, 围绕三种回收模式探究了基于参考价格效应的两期闭环供应链的定价与生产再制造策略, 同时分析了价格参考效应产生的影响, 主要结论如下:

- 1) 在 Nash 均衡博弈情形下, 相比于零售商回收和第三方回收, 制造商承担回收工作能够实现闭环供



应链系统利润最大化, 也更能促进环保绩效的提升, 此外较低的价格对消费者也有利。但该模式下制造商无法获得最高收益。

2) 在 Nash 均衡博弈情形下, 从回收绩效与系统利润视角, 零售商回收与第三方回收的优劣取决于制造商提供给回收方的成本补贴, 当成本补贴率高于阈值  $(\Delta - g)/2g$  时, 零售商回收优于第三方回收; 相反当成本补贴率低于该阈值时, 则是第三方回收更优。但无论成本补贴率如何变化, 零售商都不具备从事回收工作的动机。

3) 在 Nash 均衡博弈情形下, 随着参考价格因子的增加, 三种分散式回收模式的第一期价格和销量分别提高和降低, 第二期销量均提高, 而第二期价格取决于回收规模参数的取值; 回收率均降低; 所有渠道成员和闭环供应链系统均能从参考价格效应中获益。

未来的研究工作是将本文的新产品与再制造产品均一化定价模型拓展至差异定价情形。

## 基金项目

教育部人文社会科学研究项目(17YJC630130)。

## 参考文献

- [1] Ferrer, G. (1997) The Economics of Tire Remanufacturing. *Resources, Conservation and Recycling*, **19**, 221-255. [https://doi.org/10.1016/S0921-3449\(96\)01181-0](https://doi.org/10.1016/S0921-3449(96)01181-0)
- [2] 李新军, 达庆利. 基于产品寿命次数的闭环供应链生产优化问题研究[J]. 管理工程学报, 2009, 23(2): 50-54.
- [3] Ferrer, G. and Swaminathan, J.M. (2006) Managing New and Remanufactured Products. *Management Science*, **52**, 15-26. <https://doi.org/10.1287/mnsc.1050.0465>
- [4] Ferrer, G. and Swaminathan, J.M. (2010) Managing New and Differentiated Remanufactured Products. *European Journal of Operational Research*, **203**, 370-379. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2009.08.007>
- [5] Bulmuş, S.C., Zhu, S.X. and Teunter, R. (2013) Capacity and Production Decisions under a Remanufacturing Strategy. *International Journal of Production Economics*, **145**, 359-370. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2013.04.052>
- [6] Chen, J.M. and Chang, C.-I. (2013) Dynamic Pricing for New and Remanufactured Products in a Closed-Loop Supply Chain. *International Journal of Production Economics*, **146**, 153-160. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2013.06.017>
- [7] De Giovanni, P. and Zaccour, G. (2014) A Two-Period Game of a Closed-Loop Supply Chain. *European Journal of Operational Research*, **232**, 22-40. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2013.06.032>
- [8] 李琰, 林欣怡, 达庆利. 基于再制造的多周期闭环营销投入及定价策略[J]. 中国管理科学, 2018, 26(8): 67-74.
- [9] Baucells, M., Weber, M. and Welfens, F. (2011) Reference-Point Formation and Updating. *Management Science*, **57**, 506-519. <https://doi.org/10.1287/mnsc.1100.1286>
- [10] Kalyanaram, G. and Winer, R.S. (1995) Empirical Generalizations from Reference Price Research. *Marketing Science*, **14**, 161-169. <https://doi.org/10.1287/mksc.14.3.G161>
- [11] Popescu, I. and Wu, Y. (2007) Dynamic Pricing Strategies with Reference Effects. *Operations Research*, **55**, 413-429. <https://doi.org/10.1287/opre.1070.0393>
- [12] Ahn, H., Gümüş, M. and Kaminsky, P. (2007) Pricing and Manufacturing Decisions When Demand Is a Function of Prices in Multiple Periods. *Operations Research*, **55**, 1039-1057. <https://doi.org/10.1287/opre.1070.0411>
- [13] Güler, M.G., Bilgiç, T. and Güllü, R. (2014) Joint Inventory and Pricing Decisions with Reference Effects. *IIE Transactions*, **46**, 330-343. <https://doi.org/10.1080/0740817X.2013.768782>
- [14] Güler, M.G., Bilgiç, T. and Güllü, R. (2015) Joint Pricing and Inventory Control for Additive Demand Models with Reference Effects. *Annals of Operations Research*, **226**, 255-276. <https://doi.org/10.1007/s10479-014-1706-3>
- [15] Maiti, T. and Giri, B.C. (2017) Two-Period Pricing and Decision Strategies in a Two-Echelon Supply Chain under Price-Dependent Demand. *Applied Mathematical Modelling*, **42**, 655-674. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2016.10.051>
- [16] 楼高翔, 张永明, 万宁. 基于参考效应的动态定价和减排决策[J]. 控制与决策, 2018, 33(9): 1667-1676.
- [17] 皮德萍, 胡燕娟. 基于参考效应的闭环供应链契约协调机制[J]. 工业工程, 2010, 13(2): 39-44.
- [18] Xu, J. and Liu, N. (2017) Research on Closed Loop Supply Chain with Reference Price Effect. *Journal of Intelligent Manufacturing*, **28**, 51-64. <https://doi.org/10.1007/s10845-014-0961-0>

- [19] 孙浩, 胡劲松, 王磊, 等. 考虑参考效应的两期闭环供应链定价策略与回收模式比较[J]. 计算机集成制造系统, 2016, 22(12): 2875-2887.
- [20] Savaskan, R.C., Bhattacharya, S. and Van Wassenhove, L.N. (2004) Closed-Loop Supply Chain Models with Product Remanufacturing. *Management Science*, **50**, 239-252. <https://doi.org/10.1287/mnsc.1030.0186>

**知网检索的两种方式:**

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>  
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2169-2556, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>  
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>  
期刊邮箱: [ass@hanspub.org](mailto:ass@hanspub.org)