

# 产品设计作为竞争策略的 PRO 供应链生产决策研究

王 玥<sup>1</sup> 李帮义<sup>1</sup> 王 哲<sup>1</sup> 辛宝英<sup>1,2</sup> 朱晓东<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>(南京航空航天大学经济与管理学院, 南京 210016)

<sup>2</sup>(山东管理学院工商学院, 济南 250100)

<sup>3</sup>(南京信息工程大学经济与管理学院, 南京 210044)

〔摘要〕对于大多数无力自建 WEEE 回收体系的生产企业选择加入 PRO 是明智的选择。本文基于行业 PRO 运作模式, 构建了由两制造商和回收商联盟组成的供应链模型, 将与市场增长挂钩的产品设计作为其中一制造商的竞争策略, 研究了产品设计和回收双责任要求下供应链各主体的生产决策问题。研究发现: (1) 当产品设计成本较低和市场增量较高时, 以产品设计作为竞争策略的在位制造商可以淘汰竞争制造商; (2) 当产品设计成本低于市场增量时, 在位制造商的生产决策优于竞争制造商。一定条件下, 竞争制造商存在“搭便车”行为; (3) 产品设计降低了处理成本, 但损害了回收商经济效益, 回收商抵制过度产品设计, 并通过转移价格实现供应链主体的利润配置。当经济驱动下回收商自愿回收时, 更高的政府回收率会导致整个供应链经济效益变好; (4) 存在一个三方共赢局面使三者经济效益都更优, 存在一个双赢局面使回收商和在位制造商更优。

〔关键词〕 PRO 产品设计 竞争策略 生产决策 供应链

DOI: 10.3969/j.issn.1004-910X.2017.10.010

〔中图分类号〕 F224 〔文献标识码〕 A

## 引 言

生产者延伸责任要求制造商对自身生产的产品在消费后要进行回收处理以降低其对环境的破坏。Lindhqvist<sup>[1]</sup>将 WEEE 回收处理实现方式归纳为两类: 个体责任和集体责任。由于回收处理设备的专有性和工艺复杂性导致很多实力较弱的生产商无法承担个体责任。因此, 生产者组成合作联盟, 联合分担回收成本, 实现集体责任。生产者责任组织 (PRO, Producer Responsibility Organization) 是目前流行的一种集体责任实现模式。在政府规制下, PRO 建立共用的产品回收体系, 生产者承担一定的经济责任, 将产品回收处理责任 (即物理责任) 委托给 PRO, 由 PRO 负责联系合作的回收商进行回收处理。根据《再生资源回收体系建设中长期规划 (2015~2020 年)》要求, 国家鼓励回收企业与各类产废企业、产业集聚区

建立战略合作关系。行业 PRO 可以改变传统回收“小、散、差”的状况, 也便于强化行业秩序监管。

与本文相关的研究文献主要集中在供应链运作管理、EPR 实现模式和产品设计 3 个方面。

供应链运作管理方面, 关于供应链竞合、产品蚕食、市场增长的研究已经有很多。曹晓刚等<sup>[2]</sup>考虑了可拆卸设计和消费者偏好对新产品和再制造品的影响, 研究了成本节约、产品设计对供应链主体的决策影响。孙浩等<sup>[3]</sup>研究了由制造商和再制造商组成的两周期供应链, 研究有无专利授权下的竞争和合作模式最优博弈策略。李向荣<sup>[4]</sup>考虑扩展销售渠道会增加产品潜在需求, 研究了渠道扩张和需求增加对双渠道供应链定价的影响。本文研究了产品替代的两制造商在产品竞争环境下将成本节约与市场增长结合起来研究其生产决策问题。EPR 实现模式方面, 集体回收实现模式中

收稿日期: 2017-06-17

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (项目编号: 71671001); 中央高校基本科研业务费专项资金资助 (项目编号: NP2016303); 江苏省普通高校研究生科研创新计划项目 (项目编号: KYZZ16 0151); 教育部人文社科青年基金项目 (项目编号: 17YJCZH201)。

作者简介: 王玥, 南京航空航天大学经济与管理学院博士研究生。研究方向: 物流与供应链管理。李帮义, 南京航空航天大学经济与管理学院教授, 博士生导师。研究方向: 供应链建模与优化。王哲, 南京航空航天大学经济与管理学院博士研究生。研究方向: 生产者责任延伸。辛宝英, 南京航空航天大学经济与管理学院博士研究生, 山东管理学院工商学院讲师。研究方向: 城乡统筹与城镇化。朱晓东, 南京航空航天大学经济与管理学院博士研究生, 南京信息工程大学经济与管理学院讲师。研究方向: 供应链建模与优化。

行业 PRO 模式是本文的研究重点,但是目前已有研究成果较少。Mayers<sup>[5]</sup>以英国 PRO 回收平台为例,研究了如何通过这种回收模式实现 EPR 目标以及 PRO 运作过程中的管理问题。PRO 本质也是一种集体回收模式,Özdemir<sup>[6]</sup>构建可以互相替代的集体回收和个体回收模型,从经济、环境两个维度进行了模型比较。Esenduran<sup>[7]</sup>以成本最小化为优化目标,分析了影响集体和个体回收的相关因素,进行了两种模式的对比分析。Toyasaki<sup>[8]</sup>分析不同参与人对集体回收模式的偏好,证明大多背景下,集体回收模式是一个双赢模式。本文基于行业 PRO 运作管理模式,强调回收商的市场领导地位,研究其与竞争制造商的运作关系产品设计方面,Zuidwijk<sup>[9]</sup>认为产品设计有多种选择方式,其中模块化设计、可拆解设计等方式不会改变产品使用价值和产品功能,但是可以降低产品的回收处理难度。Örsdemir<sup>[10]</sup>认为产品设计策略与其他策略如回收策略、定价策略之间存在交互作用。本文将产品设计作为制造商的竞争策略,产品设计一方面吸引更多的绿色消费者带来市场增长<sup>[11]</sup>,另一方面降低平均回收处理成本,所以本文的贡献在于将该不改变产品功能的产品设计与节约处理成本和市场增长结合起来进行研究。

基于以上研究,本文从供应链参与主体视角出发研究解决以下几个问题:(1)制造商是否可以通过导致成本增加的产品设计策略来获利?产品设计策略如何影响该制造商的生产决策?(2)产品设计策略对竞争制造商的影响如何?竞争制造商是否能够从产品设计策略中获利?(3)产品设计策略如何影响回收商的生产决策?回收商是否会积极响应产品设计策略?(4)整个 PRO 模式下是否存在一个“三赢”或者“双赢”的局面使供应链主体实现帕累托改进。为了更好的解决以上问题,通过构建回收商领导竞争制造商的 Stackeberg 博弈来研究供应链主体的生产决策情况,通过探讨模型的经济管理启示,希望可以为了供应链参与主体的决策行为提供指导和借鉴意义。

## 1 问题与符号

### 1.1 问题描述

参照挪威现行的 PRO 运营模式<sup>[12]</sup>,竞争制

造商联合起来成立行业 PRO,PRO 由行业协会来运营管理,行业 PRO 与政府环境部门达成回收目标和监督协议,即政府规定整个行业的废弃产品回收率,然后 PRO 委托回收商联盟回收并将回收结果上报政府,其具体运行模式如图 1 所示。

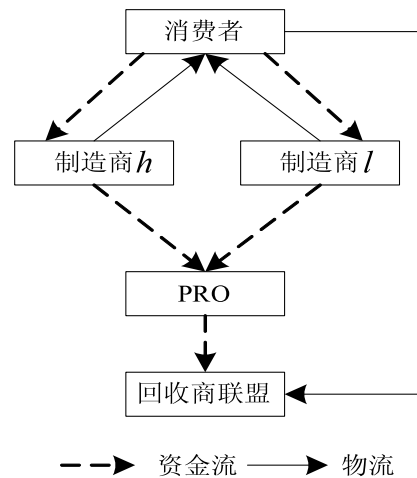


图 1 行业 PRO 模式供应链运作流程

假设行业中存在不同品牌的制造商  $h$  和  $l$ , 其产品  $h$  和  $l$  之间存在替代关系, 价格形成机制分别为  $p_h = 1 - q_h - \alpha q_l$ ,  $p_l = 1 - q_l - \alpha q_h$ 。  $\alpha \in [0, 1]$  表示产品可替代程度。两产品分别以  $p_h$  和  $p_l$  的价格将产品卖给消费者。两种产品的生产成本完全相同, 为了简化计算, 假设生产成本都为 0。制造商承担产品设计责任, 采用模块化或者可拆解产品设计不会导致产品功能的变化, 但是会导致产品生产成本的增加, Atalay<sup>[13]</sup>认为这种生产成本提高是增量化的, 假设产品设计增量成本为  $c$ 。制造商  $h$  改进产品设计可以吸引更多的绿色消费者, 借鉴 Zhu W<sup>[14]</sup>的研究, 逆需求函数为  $p_h = Q - q_h - \alpha q_l$ , 其中,  $Q > 1$ 。  $Q - 1 > 0$  表示制造商  $h$  采用产品设计增加的预期市场容量。

行业 PRO 运营模式下, 制造商和回收商之间形成委托代理关系。制造商按行业规制回收率  $\tau$  来承担废弃产品经济责任, 转移自身物理责任给回收商。PRO 代表所有制造商与回收商联盟进行谈判, 其维持自身运营的成本费用来自于制造商, 为了简化计算, 假设该成本费用为 0。回收商通过 PRO 向制造商收取统一的转移支付  $d$  作为承担 EOL 产品回收处理的费用。为了降低产品回收识别成本, 回收商回收时不区分产品品牌, 但

保证行业产品回收总量符合政府规制行业回收率 $\tau$ 。假设产品处理成本为回收商私有信息。在处理过程中,当两产品设计无差异时,回收处理成本为 $r$ ,当制造商 $d$ 采用环保设计时可以降低单位处理成本,节约成本为 $\Delta$ 。假设回收的废弃产品中产品 $d$ 的回收比率为 $1-\lambda$ ,则平均回收处理成本为 $(1-\lambda)(r-\Delta)+\lambda r$ ,化简后为 $r-(1-\lambda)\Delta$ 。EOL产品回收处理后的残余价值为 $v$ ,且 $v < r$ 。

PRO 运作模式下的竞争决策是一个两阶段顺序博弈,回收商扮演 Stackeberg 的领导者,制造商作为跟随者。当然这也与实际相符,Toyasaki<sup>[8]</sup>认为 WEEE 回收中制造商有义务回收 EOL 产品,他们必须使用回收商提供的回收服务。第一阶段,回收商根据制造商的反应制定转移支付价格 $d$ ;第二阶段,两个制造商进行古诺竞争,制定产品产量 $q_h$ 和 $q_l$ 。

### 1.2 符号说明

本文中的相关符号归纳到表 1。

表 1 文中符号说明

符号	符号描述
参与者	$i$ 制造商 $i$ / 产品 $i, i \in \{h, l\}$ $R$ 回收商联盟
价格产量	$P_i$ 产品 $i$ 的销售价格 $d$ 模式 $j$ 下转移支付价格 $q_i$ 产品 $i$ 的销售数量
成本收益	$v$ EOL 产品的残余价值 $c$ 产品设计增量成本 $\Delta$ 产品设计带来的节约处理成本 $r$ 回收商对 EOL 产品的处理成本
比率	$\lambda$ $l$ 产品回收份额 $\tau$ 政府规制行业回收率, $0 < \tau < 1$
上下标	$j$ $j \in \{B, P\}$ 分别表示无产品设计和有产品设计模式 $k$ $k \in \{h, l, R\}$ 分别表示制造商 $h, l$ 和分销商
目标	$\Pi'_k$ $j$ 模式下供应链主体的利润

## 2 模型建立及求解

### 2.1 无产品设计模式 (B)

模式 B 作为标杆模型,制造商和回收商的最优利润函数分别为:

$$\max_{q_h > 0} \pi_h = p_h q_h - \tau q_h d \quad (1)$$

$$\max_{q_l > 0} \pi_l = p_l q_l - \tau q_l d \quad (2)$$

$$\max_{d > 0} \pi_R = \tau (q_h + q_l)(d + v) - (r - (1 - \lambda)\Delta)\tau (q_h + q_l) \quad (3)$$

### 2.2 产品设计模式 (P)

模式 P 下制造商  $h$  采纳利于拆解循环的产品设计,则制造商和回收商的最优利润函数为:

$$\max_{q_h > 0} \pi_h = (p_h - c)q_h - \tau q_h d \quad (4)$$

$$\max_{q_l > 0} \pi_l = p_l q_l - \tau q_l d \quad (5)$$

$$\max_{d > 0} \pi_R = \tau (q_h + q_l)(d + v) - (r - (1 - \lambda)\Delta)\tau (q_h + q_l) \quad (6)$$

利用逆向归纳法求解模式 B 和 P 的均衡解及最优利润,结果见表 2。

## 3 模式比较分析

### 3.1 B 模式最优解分析

将 B 模式均衡解和最优利润分别对参数 $\alpha$ 、 $\tau$ 和 $r$ 求偏导,结果在表 3 中列示。由于制造商  $h$  和  $l$  生产决策完全相同,所以仅以制造商  $h$  为例。

结论 1: B 模式均衡解和最优利润随替代系数 $\alpha$ ,回收率 $\tau$ 和处理成本 $r$ 的变化情况如表 3 所示。符号“ $\nearrow$ ”、“ $\searrow$ ”、“ $N$ ”分别表示单调增,单调减和与参数无关。

结论 1 表明随着 $\alpha$ 变大,产品差异变小导致竞争加剧,产量、定价和利润下降。随着 $\tau$ 变大,虽然 $d$ 减小,但回收量增加,总回收成本增加,所以销售价格仍然会提高,导致产量和利润下降。随着 $r$ 变大,制造商所承担经济责任增加,从而提高销售价格转嫁给消费者,导致产量和利润下降。

### 3.2 P 模式最优解分析

结论 2: P 模式存在经济意义时必须满足

$$\frac{(3\alpha + 2)Q + \Theta - 6 - \alpha}{3\alpha + 2} < c < \frac{(\alpha + 6)Q - 3\alpha + \Theta - 2}{\alpha + 6} \text{ 且 } Q - 1 >$$

$$\frac{4 - 2\alpha - \Theta}{3\alpha + 2} \circ$$

证明:令 $q_h$ 、 $q_l$ 、 $d$ 和 $c$ 分别大于 0,可证

$$\frac{(3\alpha + 2)Q + \Theta - 6 - \alpha}{3\alpha + 2} < c < \frac{(\alpha + 6)Q - 3\alpha + \Theta - 2}{\alpha + 6} \text{。由 } c > 0$$

可得 $\frac{(3\alpha + 2)Q + \Theta - 6 - \alpha}{3\alpha + 2} > 0$ ,可得 $Q > \frac{6 + \alpha - \Theta}{3\alpha + 2}$ ,可证

$$Q - 1 > \frac{4 - 2\alpha - \Theta}{3\alpha + 2} \circ$$

结论 2 表明,存在一个产品设计增量成本范围,制造商  $h$  与  $l$  的产品同时存在且相互竞争。过高的设计成本  $c$  将会迫使制造商  $h$  停止生产。当较低产品设计成本可以带来足量市场增量时,产品设计作为制造商  $h$  的市场竞争策略,将制造商  $l$  从市场中淘汰。

表2 模式B和P的均衡解及最优利润

均衡解	模式B	模式P
$p_h$	$\frac{\alpha + (\alpha + 1)\tau(r - v) + 3}{2(\alpha + 2)}$	$\frac{\alpha^2 + 3\alpha + (3\alpha^2 + \alpha - 6)c + ((\alpha - 1)\alpha - 10)Q + (\alpha + 1)\Theta - 2}{4(\alpha^2 - 4)}$
$p_l$	$\frac{\alpha + (\alpha + 1)\tau(r - v) + 3}{2(\alpha + 2)}$	$\frac{\alpha^2 - \alpha - (\alpha(\alpha + 3) - 2)c + (\alpha(\alpha + 3) - 2)Q + (\alpha + 1)\Theta - 10}{4(\alpha^2 - 4)}$
$q_h$	$\frac{1 - r\tau + \tau v}{2\alpha + 4}$	$\frac{3\alpha + (\alpha + 6)c - (\alpha + 6)Q - \Theta + 2}{4(\alpha^2 - 4)}$
$q_l$	$\frac{1 - r\tau + \tau v}{2\alpha + 4}$	$\frac{\alpha + (3\alpha + 2)c - (3\alpha + 2)Q + \Theta + 6}{4(4 - \alpha^2)}$
$d$	$\frac{1 + r\tau - \tau v}{2\tau}$	$\frac{1 - c + Q + 2\tau(\Delta(\lambda - 1) + r - v)}{4\tau}$
$\pi_h$	$\frac{(1 - r\tau + \tau v)^2}{4(\alpha + 2)^2}$	$\frac{(3\alpha + (\alpha + 6)c - (\alpha + 6)Q - \Theta + 2)^2}{16(\alpha^2 - 4)^2}$
$\pi_l$	$\frac{(1 - r\tau + \tau v)^2}{4(\alpha + 2)^2}$	$\frac{(\alpha + (3\alpha + 2)c - (3\alpha + 2)Q + \Theta + 6)^2}{16(\alpha^2 - 4)^2}$
$\pi_R$	$\frac{(1 - r\tau + \tau v)^2}{2(\alpha + 2)}$	$\frac{(-c + Q + 2\tau(-\Delta\lambda + \Delta - r + v) + 1)^2}{8(\alpha + 2)}$

注:  $\Theta = 2(\alpha - 2)\tau(\Delta(\lambda - 1) + r - v)$ 。

表3 B模式下参数对均衡解和最优利润的影响

参数	均衡解				
	$p_h$	$q_h$	$d$	$\pi_h$	$\pi_R$
$\alpha$	↘	↘	N	↘	↘
$\tau$	↗	↘	↘	↘	↘
	↗	↘	↗	↘	↘

表2中P模式均衡解和最优利润分别对参数 $\alpha$ 、 $c$ 、 $\Delta$ 、 $\tau$ 、 $r$ 、 $\lambda$ 和 $Q$ 求偏导。

结论3: P模式下供应链各主体的均衡解和最优利润随着产品替代系数 $\alpha$ 、产品设计增量成本 $c$ 、节约处理成本 $\Delta$ 、规制回收率 $\tau$ 、处理成本 $r$ 、回收份额 $\lambda$ 和预期市场需求 $Q$ 的变化趋势如表4所示。符号“↗”、“↘”、“N”、“~”分别表示单调增, 单调减、与参数无关和单调性不确定。

结论3表明, 随着 $\alpha$ 变大, 制造商I和回收商R的生产决策水平都会降低, 而制造商h的生产决策情况不确定, 将在第4节数值分析中说明。随着 $c$ 变大, 制造商h将成本压力转移给消费者导致销售价格提高, 利润下降。但产品设计降低了平均处理成本, 导致回收商R降低了 $d$ 导致利润下降。值得注意的是,  $\alpha$ 取值不同,  $c$ 对制造商I定价决策影响不同。当 $\alpha$ 足够大时, 制造商I销售价格会下降, 反之, 则会提高。产量增加导致其利润增加。

随着 $\Delta$ 增长, 回收商R平均处理成本下降导致 $d$ 下降, 两制造商需要承担的经济责任减少, 所以销售价格降低导致产量和利润增加。值得注意的是, 产品设计有利于循环回收, 改善两制造商经济效益, 但回收商利润降低。所以, 回收商没有理由支持过度环保的产品设计。

随着 $c$ 增长, 只有 $d$ 降低, 供应链其他决策都同时受到 $r$ 与 $(1 - \lambda)\Delta + v$ 的影响。当 $r > (1 - \lambda)\Delta + v$ , 即产品处理成本 $r$ 大于EOL产品的残余价值 $v$ 和节约处理成本 $(1 - \lambda)\Delta$ 时, 回收商的回收处理行为不是经济驱动的完全自愿回收, 所以随着回收率 $\tau$ 增长, 整个供应链回收处理任务加重, 回收商转移支付 $d$ 的下降可以平衡供应链中制造商的压力, 所以回收商利润不得已降低。由于两制造商将更多的EOL产品经济责任转移给消费者导致销售价格的提高, 引起产量和利润的下降。相反, 当 $r < (1 - \lambda)\Delta + v$ , 即回收商回收处理行为是经济驱动下完全自愿回收, 回收商愿意主动回收更多的EOL产品来提高利润, 此时转移支付 $d$ 下降可以减少两制造商将承担的EOL产品经济责任减少, 从而销售价格降低, 引起产量和利润的提高。

随着 $r$ 和 $\lambda$ 增长, 虽然转移价格 $d$ 提高, 但导致了回收商利润下降和制造商产量、利润的下降。随着 $Q$ 增长, 产品h的价格、产量和利润的增加, 同时也导致回收商转移支付价格和利润的增加。但是对于制造商I的定价决策受到 $\alpha$ 的影响。

分别对P模式下两制造商的价格、产量和利润做差比较,经计算可得:

$$\Delta p^P = p_h^P - p_l^P > 0, \Delta q^P = q_h^P - q_l^P = \frac{c-Q+1}{\alpha-2},$$

$$\Delta \pi^P = \pi_h^P - \pi_l^P = \frac{(Q-1-c)(c-Q+2\tau(\Delta(\lambda-1)+r-v)-1)}{2(\alpha^2-4)}.$$

结论4: P模式下, 制造商h产品定价高于制造商l。当制造商h产品设计策略获益, 即 $c < Q-1$ 时,  $q_h^P > q_l^P$ ,  $\pi_h^P > \pi_l^P$ 。反之,  $q_h^P < q_l^P$ ,  $\pi_h^P < \pi_l^P$ 。

结论4表明产品设计成本承担导致制造商h产品价格提高, 由于制造商l没有额外产品设计成本, 其销售价格低于制造商h反应其价格竞争优势。对于制造商产量决策来说, 产品设计增量成本c提高会导致制造商h产量减少, 同时也会导致

制造商l产量增加。 $\Delta q^P$ 的临界点取决于产品设计增量成本c与预期市场增量 $Q-1$ 的关系, 即制造商h产品设计可获利程度。当 $c < Q-1$ 时, 说明承担产品设计可以获得足够多的预期市场增量, 即制造商h产品设计获益足以弥补成本增加带来的压力, 此时制造商h产量高于l。从制造商利润来说, 当 $c < Q-1$ 时, 制造商h从产品设计策略中可以获益更多; 当 $c > Q-1$ 时, 制造商l从产品设计策略中获益更多。

### 3.3 P、B模式最优解比较分析

分别对P、B模式下两制造商的价格做差比较, 经计算得:

表4 P模式下参数对均衡解和最优利润的影响

参数	均衡解							
	$p_h$	$p_l$	$q_h$	$q_l$	$d$	$\pi_h$	$\pi_l$	$\pi_R$
$\alpha$	~	↘	~	↘	N	~	↘	↘
c	$\alpha < \frac{\sqrt{17}-3}{2}$		↘					
	$\alpha > \frac{\sqrt{17}-3}{2}$	↗	↗	↘	↘	↘	↗	↘
	$\alpha > \frac{\sqrt{17}-3}{2}$							
$\Delta$		↘	↘	↗	↗	↘	↗	↗
	$r > (1-\lambda)\Delta+v$	↗	↗	↘	↘	↘	↘	↘
	$r < (1-\lambda)\Delta+v$	↘	↘	↗	↗	↗	↗	↗
r		↗	↗	↘	↘	↗	↘	↘
	$\lambda$	↗	↗	↘	↘	↗	↘	↘
Q	$\alpha < \frac{\sqrt{17}-3}{2}$		↗					
	$\alpha > \frac{\sqrt{17}-3}{2}$	↗	↗	↗	↘	↗	↘	↗
	$\alpha > \frac{\sqrt{17}-3}{2}$							

$$\Delta p_h = p_h^P - p_h^B > 0,$$

$$\Delta p_l = p_l^P - p_l^B = \frac{(\alpha(\alpha+3)-2)(c-Q+1)-2(\alpha-2)(\alpha+1)\Delta(\lambda-1)\tau}{4(4-\alpha^2)}.$$

$\Delta p_l$ 大小不仅受到产品设计增量成本c影响, 而且与产品替代系数 $\alpha$ 有关。

结论5: P模式制造商h产品定价要高于B模式。与B模式相比, 当产品替代系数 $\alpha > \frac{\sqrt{17}-3}{2}$ 且制造商产品设计获益 $(Q-1)-c < \frac{2(\alpha-2)(\alpha+1)\Delta(1-\lambda)\tau}{\alpha(\alpha+3)-2}$ 时或者当产品替代系数 $0 < \alpha < \frac{\sqrt{17}-3}{2}$ 且产品设计获益 $(Q-1)-c > \frac{2(\alpha-2)(\alpha+1)\Delta(1-\lambda)\tau}{\alpha(\alpha+3)-2}$ 时, P模式下

制造商l产生溢价效应。

结论5表明, 相比于B模式, 制造商h的产品设计策略导致产品溢价。当 $\alpha$ 与c满足一定条件时, 制造商l也产生溢价效应。如表5所示, 区间 $(D_1, D_7)$ 上P模式的制造商l定价更低, 因为产品设计策略导致平均处理成本降低, 回收商降低了转移支付d, 制造商l定价从产品设计中获益。

分别对P、B模式下两制造商的产量做差比较, 经计算得:

$$\Delta q_h = q_h^P - q_h^B = \frac{(\alpha+6)(c-Q+1)-2(\alpha-2)\Delta(\lambda-1)\tau}{4(\alpha^2-4)}$$

$$\Delta q_l = q_l^P - q_l^B$$

$$= \frac{2(\alpha-2)\Delta(\lambda-1)\tau + (3\alpha+2)(c-Q+1)}{4(4-\alpha^2)}$$

结论6: 当产品设计增量成本 $c$ 满足条件 $Q-1 - \frac{2(\alpha-2)\Delta(\lambda-1)\tau}{3\alpha+2} < c < \frac{2(\alpha-2)\Delta(\lambda-1)\tau}{\alpha+6} + Q-1$ 时, 制造商 $h$ 和 $l$ 的产量都会增加, 制造商 $l$ 在产量决策上从 $h$ 的产品设计中获益。

结论6表明,  $P$ 模式制造商 $h$ 产品设计获益满足条件 $\frac{2(\alpha-2)\Delta(1-\lambda)\tau}{\alpha+6} < (Q-1)-c < \frac{2(2-\alpha)\Delta(1-\lambda)\tau}{3\alpha+2}$ 时, 制造商 $h$ 和 $l$ 的产量都高于 $B$ 模式, 结合结论4可知,  $0 < (Q-1)-c < \frac{2(2-\alpha)\Delta(1-\lambda)\tau}{3\alpha+2}$ 下 $p_h^P > p_l^P$ ,  $q_h^P > q_l^P$ ,  $\pi_h^P > \pi_l^P$ , 说明当制造商 $h$ 产品设计获益足够大时, 制造商 $h$ 获利性最好。当制造商 $h$ 产品设计获益不够大, 即 $\frac{2(\alpha-2)\Delta(1-\lambda)\tau}{\alpha+6} < (Q-1)-c < 0$ 时,  $p_h^P > p_l^P$ ,  $q_h^P < q_l^P$ ,  $\pi_{Mh}^P < \pi_{Ml}^P$ , 说明产品设计策略对于制造商 $h$ 来说是一种策略负担, 制造商 $l$ “搭便车”获利巨大。

分别对 $P$ 、 $B$ 模式下两制造商的转移支付 $d$ 做差比较, 经计算得:

$$\Delta d = d^P - d^B = \frac{Q-c+2\Delta(\lambda-1)\tau-1}{4\tau}$$

结论7: 当产品设计增量成本满足 $c > 2\Delta(\lambda-1)\tau + Q-1$ 时,  $P$ 模式转移价格低于 $B$ 模式, 反之,  $P$ 模式转移价格高于 $B$ 模式。

结论7表明, 制造商 $h$ 产品设计获益与节约处理成本 $\Delta$ 之间有一个权衡, 而回收商通过转移支付 $d$ 来实现调整。当 $(Q-1)-c < 2\Delta(1-\lambda)\tau$ 时, 说明制造商产品设计获益低于回收商处理成本节约收益, 回收商获利更多, 因此, 回收商会降低索取的转移价格 $d$ , 从而导致制造商 $h$ 和 $l$ 承担的单位经济责任减少, 制造商 $l$ 在转移价格上存在“搭便车”行为。但是当 $(Q-1)-c > 2\Delta(1-\lambda)\tau$ 时, 说明制造商产品设计获益高于回收商处理成本节约收益, 制造商获利更多, 则回收商会提高转移价格 $d$ 。

比较 $B$ 和 $P$ 模式下回收商的利润, 经计算可得:

$$\Delta\pi_R = \pi_R^P - \pi_R^B = \frac{(1-c+Q+2\tau(v-\Delta\lambda+\Delta-r))^2 - 4(1-r\tau+\tau v)^2}{8(\alpha+2)}$$

可证,  $c > 2\Delta(1-\lambda)\tau + Q-1$ ,  $\pi_R^P < \pi_R^B$ 。

结论8: 产品设计增量成本满足 $c > 2\Delta(1-\lambda)\tau +$

$Q-1$ 时,  $\pi_R^P < \pi_R^B$ , 反之,  $\pi_R^P > \pi_R^B$ 。

结论8表明, 制造商产品设计获益低于某个阈值时或者说产品设计增量成本过高时, 即 $(Q-1)-c < -2\Delta(1-\lambda)\tau$ 时, 回收商对于过度环保的产品设计是持抵制态度的。当设计成本过高, 即产品过度环保时, 与 $B$ 模式相比,  $P$ 模式下回收商利润下降。回收商对于制造商产品设计水平的底线就是不可以让制造商产品设计成本高于制造商市场增长和产品节约成本之和, 即 $(Q-1)+2\Delta(1-\lambda)\tau > c$ 。

将结论1~8中产品设计增量成本 $c$ 的边界条件进行比较分析, 可以得到不同产品设计成本增量 $c$ 下的各供应链主体的生产决策机制, 如表5所示。符号“+”、“-”、“0”分别表示差额为正, 差额为负和差额为0。表5实质是供应链主体生产决策随着增量成本 $c$ 的变化情况, 主要结论与表4增量成本 $c$ 的结果一致。

结论9: 如表5所示, 当 $c \in (D_3, D_4)$ 时, 制造商 $h$ 、 $l$ 和回收商 $R$ 三方共赢的局面, 制造商 $l$ 存在“搭便车”行为。当 $c \in (D_0, D_1)$ 时, 制造商 $h$ 和回收商 $R$ 存在一个共赢局面, 制造商 $l$ 竞争力最弱。

结论9表明, 存在一个制造商 $h$ 、制造商 $l$ 、回收商 $R$ 三方共赢局面, 即当产品设计成本增量 $c \in (D_3, D_4)$ 时, 供应链三方的生产决策都优于 $B$ 模式。而且 $P$ 模式下制造商 $h$ 价格、产量和利润决策高于制造商 $l$ 。 $P$ 模式下制造商 $l$ 定价低于 $B$ 模式, 产量、利润高于 $B$ 模式, 所以制造商 $l$ 存在“搭便车”行为。相比于 $B$ 模式, 当 $c \in (D_0, D_1)$ 时, 制造商 $h$ 和回收商 $R$ 经济效益变好。转移价格 $d$ 提高, 产量 $q_l$ 的下降导致制造商 $l$ 效益变差, 当 $c < D_0$ 时, 制造商 $l$ 已经被市场淘汰。

#### 4 算例分析

本节利用算例来进行直观分析替代系数 $\alpha$ 对制造商的生产决策以及利润变化的影响。获取相关参数取值如下:  $v=0.04$ 、 $c=0.04$ 、 $\tau=0.6$ 、 $\lambda=0.5$ 、 $\Delta=0.02$ 、 $r=0.08$ 、 $Q=1/1.05/1.3/1.5/1.8$ 。

由图2可知, 制造商 $h$ 的利润并不是完全单调递减。随着产品替代系数 $\alpha$ 变大, 产品差异性变小, 两产品竞争更激烈, 从而导致了利润下降, 但随着 $Q$ 的增大, 当产品替代系数 $\alpha$ 超过一定阈值

表5 产品设计成本增量  $c$  对供应链主体生产决策的影响

$c$ 边界参数	$(D_0, D_1)$	$(D_1, D_2)$	$(D_2, D_3)$	$(D_3, D_4)$	$(D_4, D_5)$	$(D_5, D_6)$	$(D_6, D_7)$	$(D_7, D_8)$
$p_h^B$	+	+	+	+	+	+	+	+
$p_l^B$	+	+	+	+	+	+	+	+
$\Delta p^B = p_h^B - p_l^B$	0	0	0	0	0	0	0	0
$p_h^P$	+	+	+	+	+	+	+	+
$p_l^P$		+	+	+	+	+	+	+
$\Delta p^P = p_h^P - p_l^P$	+	+	+	+	+	+	+	+
$\Delta p_h = p_h^P - p_h^B$	+	+	+		+	+	+	+
$\Delta p_l$	$\alpha > \frac{1}{2}(\sqrt{17}-3)$	-	-	-	-	-	-	+
	$\alpha < \frac{1}{2}(\sqrt{17}-3)$	+	-	-	-	-	-	-
$q_h^B$	+	+	+	+	+	+	+	+
$q_l^B$	+	+	+	+		+	+	+
$\Delta q^B = q_h^B - q_l^B$	0	0	0	0	0	0	0	0
$q_h^P$	+	+	+	+	+	+	+	
$q_l^P$	+	+	+	+	+	+	+	+
$\Delta q^P = q_h^P - q_l^P$	+	+	+	+	-	-	-	-
$\Delta q_h = q_h^P - q_h^B$	+	+	+	+	+	-	-	-
$\Delta q_l = q_l^P - q_l^B$	-	-	-	+	+	+	+	+
$\Delta d = d^P - d^B$	+	+	-	-	-	-	-	-
$\Delta \pi^P = \pi_h^P - \pi_l^P$	+	+	+	+	-	-	-	-
$\Delta \pi_h = \pi_h^P - \pi_h^B$	+	+	+	+	-	-	-	-
$\Delta \pi_l = \pi_l^P - \pi_l^B$	-	-	-	+	+	+	+	+
$\Delta \pi_R = \pi_R^P - \pi_R^B$	+	+	+	+	+	+	-	-

注:  $D_0 = \frac{(3\alpha+2)Q + \Theta - 6 - \alpha}{3\alpha+2}$ ,  $D_1 = \frac{2(\alpha-2)(\alpha+1)\Delta(\lambda-1)\tau}{\alpha(\alpha+3)-2} + Q - 1$  且  $\alpha < \frac{1}{2}(\sqrt{17}-3)$ ,  $D_2 = 2\Delta(\lambda-1)\tau + Q - 1$ ,  $D_3 = Q - 1 - \frac{2(\alpha-2)\Delta(\lambda-1)\tau}{3\alpha+2}$ ,  $D_4 = Q - 1$ ,  $D_5 = \frac{2(\alpha-2)\Delta(\lambda-1)\tau}{\alpha+6} + Q - 1$ ,  $D_6 = 2\Delta(1-\lambda)\tau + Q - 1$ ,  $D_7 = \frac{2(\alpha-2)(\alpha+1)\Delta(\lambda-1)\tau}{\alpha(\alpha+3)-2} + Q - 1$  且  $\alpha > \frac{1}{2}(\sqrt{17}-3)$ ,  $D_8 = \frac{(\alpha+6)Q - 3\alpha + \Theta - 2}{\alpha+6}$ .

(如图2圆圈标注点)时, 利润反而开始增加, 而且随着  $Q$  增大, 阈值点左移, 逐渐变小, 说明两产品差异变小, 消费者偏好绿色产品导致利润提高。

由图3可知, 当  $Q=1.05$ ,  $\alpha < 0.15$  时(如图3圆圈标注点),  $\pi_l^P > \pi_l^B$ , 制造商  $l$  存在搭便车行为。随着  $\alpha$  和  $Q$  变大, 制造商  $h$  产品设计策略竞争优势凸显, 制造商  $l$  利润下降。但是当  $Q$  足够大(即  $Q=1.5/1.8$ ) 时, 当  $\alpha$  超过一定阈值(如图3圆圈标注点), 制造商  $l$  利润增加, 而且随着  $Q$  增大, 阈值点左移, 逐渐变小。从图3趋势来看制造商  $l$  依然可能存在搭便车行为。

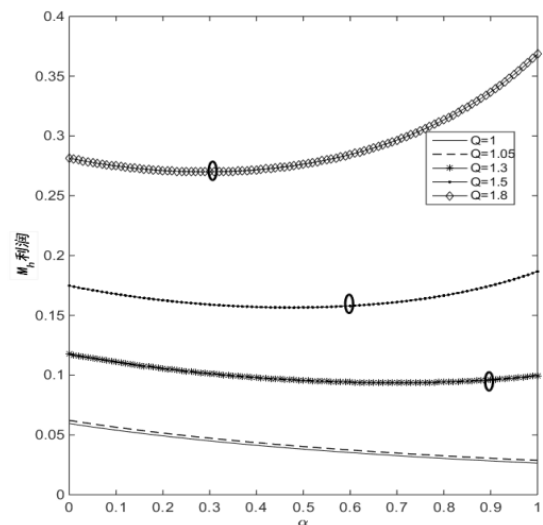


图2 B和P模式下制造商  $h$  利润变化

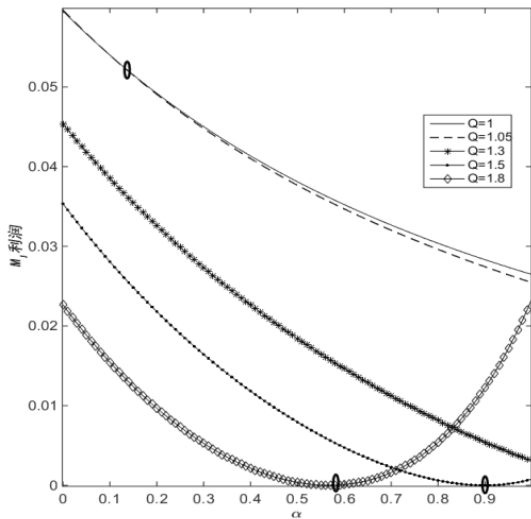


图3 B和P模式下制造商/利润变化

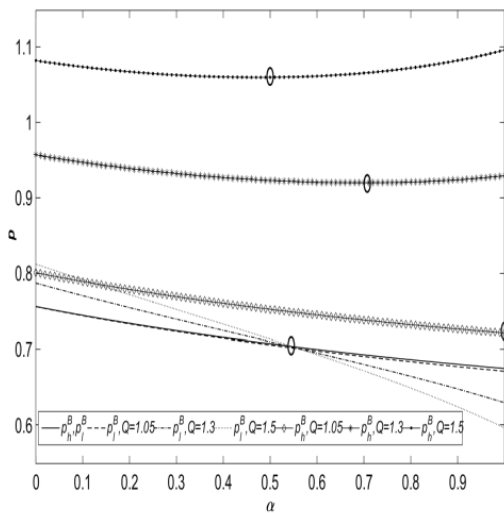


图4 B和P模式下价格变化

由图4可知，P模式下产品h的定价高于B模式。定价随着产品替代系数 $\alpha$ 的变大而降低，当 $\alpha$ 超过一定阈值后，随着 $\alpha$ 变大而提高，随着 $Q$ 的变大， $\alpha$ 的阈值点逐渐左移。而当 $Q$ 足够小（即 $Q=1.05$ ）时，P模式下 $l$ 产品定价总低于B模式，当 $Q$ 逐渐变大， $\alpha \in (0, 0.55)$ 时，P模式下产品定价高于B模式。当 $\alpha \in (0.55, 1)$ 时，P模式下产品定价低于B模式。

### 5 结论与展望

本文考虑了产品设计和回收责任，构建了由制造商和回收商构成的PRO供应链运作模式，将与市场增长挂钩的产品设计作为制造商的竞争策略，研究了供应链各主体的生产决策问题，研

究发现：（1）制造商视角。在位制造商 $h$ 将产品设计作为竞争策略，较低的产品设计增量成本和较高的市场增长可以将竞争者 $l$ 从市场中淘汰。当 $c < Q - 1 = D_4$ 时，即产品设计获益时，制造商 $h$ 的产品价格、产量和利润高于无产品设计水平，也高于制造商 $l$ 。反之，制造商 $l$ 的生产决策更优，“搭便车”行为更加明显，损害制造商 $h$ 利益；（2）回收商视角。节约成本 $\Delta$ 提高降低了产品回收处理成本，制造商经济效益变好，但回收商利润会下降；当引入产品设计增量成本过高时，即 $(Q - 1) - c < -2\Delta(1 - \lambda)\tau$ ，回收商利润变糟，所以，回收商不会支持过度环保的产品设计，回收商对于制造商产品设计的底线就是制造商产品设计成本不能高于市场增长和产品节约成本之和。回收商可以调控转移价格 $d$ 进行供应链利润的配置。当 $r > (1 - \lambda)\Delta + v$ ，即回收商是经济驱动下非完全自愿回收时，则过高的回收率要求加重了整个供应链成本负担，更高的环境效益导致供应链各主体经济效益变糟。当 $r < (1 - \lambda)\Delta + v$ ，即回收商是经济驱动下完全自愿回收时，更高的环境效益导致供应链各主体经济效益都变好；（3）供应链视角。产品设计策略下，存在一个制造商 $h$ 、制造商 $l$ 和回收商 $R$ 共赢的局面，即当产品设计成本增量 $c \in (D_3, D_4)$ 时，供应链三方的生产决策都优于B模式。P模式下制造商 $h$ 价格、产量和利润决策高于制造商 $l$ 。P模式下制造商 $l$ 定价低于B模式，产量、利润高于B模式，所以存在搭便车行为。

本文模型考虑不完全信息会导致问题更加复杂；也可以考虑多个回收者共同竞争，而不是合作联盟，这将会在以后的研究中进行进一步的探讨。

### 参考文献

[1] Lindhqvist T, Lifset R. Can we Take the Concept of Individual Producer Responsibility from Theory to Practice? [J]. Journal of industrial ecology, 2003, 7 (2): 3 ~ 6.  
[2] 曹晓刚, 郑本荣, 闻卉. 基于DFD的再制造系统生产及定价联合决策研究 [J]. 管理工程学报, 2016, 30 (1): 117 ~ 123.  
[3] 孙浩, 叶俊, 胡劲松, 等. 不同决策模式下制造商与再制造商的博弈策略研究 [J]. 中国管理科学, 2017, 25 (1): 160 ~ 169.  
[4] 李向荣, 张克勇. 基于市场需求增加的双渠道闭环供应链定

- 价机制研究 [J]. 运筹与管理, 2015, 24 (4): 58 ~ 67.
- [5] Mayers K, Butler S. Producer Responsibility Organizations Development and Operations [J]. Journal of Industrial Ecology, 2013, 17 (2): 277 ~ 289.
- [6] Öznur Özdemir-Akyıldırım. Deposit-refund System vs. Compliance Scheme Membership: How to Comply with Producer Responsibility Regulations? [J]. International Journal of Production Economics, 2015, 162: 25 ~ 44.
- [7] Esenduran G, Kemahlıoğlu - Ziya E. A Comparison of Product Take - Back Compliance Schemes [J]. Production and Operations Management, 2015, 24 (1): 71 ~ 88.
- [8] Toyasaki F, Boyacı T, Verter V. An Analysis of Monopolistic and Competitive Take - Back Schemes for WEEE Recycling [J]. Production and Operations Management, 2011, 20 (6): 805 ~ 823.
- [9] Zuidwijk R, Krikke H. Strategic Response to EEE Returns: Product eco-design or New Recovery Processes? [J]. European Journal of Operational Research, 2008, 191 (3): 1206 ~ 1222.
- [10] Örsdemir A, Kemahlıoğlu - Ziya E, Parlaktürk A K. Competitive Quality Choice and Remanufacturing [J]. Production and Operations Management, 2014, 23 (1): 48 ~ 64.
- [11] 李新然, 陈蓉. 基于政府基金政策的再制造闭环供应链最优决策研究 [J]. 管理评论, 2015, 27 (10): 183 ~ 194.
- [12] Renningen B. Competitors Together in PRO (Producers Responsibility Organisation) - a Case Study of the PRO-System in Norway [C]. IEEE International Symposium on Electronics and the Environment. IEEE, 2005: 45 ~ 48.
- [13] Atasu A, Subramanian R. Extended Producer Responsibility for E - Waste: Individual or Collective Producer Responsibility? [J]. Production and Operations Management, 2012, 21 (6): 1042 ~ 1059.
- [14] Zhu W, He Y. Green Product Design in Supply Chains Under Competition [J]. European Journal of Operational Research, 2017, 258 (1): 165 ~ 180.

## Research on Production Decision of Supply Chain in PRO Mode under Product Design as a Competitive Strategy

Wang Yue<sup>1</sup> Li Bangyi<sup>1</sup> Wang Zhe<sup>1</sup> Xin Baoying<sup>1,2</sup> Zhu Xiaodong<sup>1,3</sup>

(1. College of Economics and Management, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;

2. College of Business, Shandong Management University, Jinan 250100, China;

3. College of Economics and Management, Nanjing University of Information Science&Technology, Nanjing 210044, China)

[ **Abstract** ] It is a wise choice for most manufacturers who are unable to build their own WEEE recycling systems. Based on the mode of the PRO operation, we build a supply chain model consisting of two manufacturers and one recycler, and make product design linked with market growth as a competition strategy of one manufacturer, and study the production decision of supply chain under the requirement of dual responsibility of product design and recycling. The results suggest that: when the product design cost is low and the market incremental is higher, the incumbent manufacturer that adopts product design as a competition strategy can eliminate competitive manufacturer. When the product design cost is lower than market incremental, the production decision of incumbent manufacturer is better than that of the competitor. Under certain conditions, competitive manufacturer can have a “free rider” behavior. Product design can decrease the processing cost, but it also can damage the economic benefits of recycler. So recycler can resist excessive product design and realize the distribution of profits through transferring price. When recycling is driven by voluntary, higher recovery target of government can lead the benefits of the whole supply chain increase. There is a win-win-win situation to enable the economic benefits of the three are better. There is a win-win situation that makes recycler and incumbent manufacturer better.

[ **Key words** ] PRO; product design; competitive strategy; production decision; supply chain

(责任编辑: 史琳)