

柳键,谢军.考虑绿色投入水平与回收努力程度的再制造闭环供应链决策研究[J].江西师范大学学报(自然科学版),2023,47(6):562-570.

LIU Jian,XIE Jun.The decision-making of remanufacturing closed-loop supply chain considering green process input and recycling effort[J].Journal of Jiangxi Normal University(Natural Science),2023,47(6):562-570.

文章编号:1000-5862(2023)06-0562-09

考虑绿色投入水平与回收努力程度的 再制造闭环供应链决策研究

柳 键¹,谢 军^{1,2}

(1.江西财经大学信息管理学院,江西 南昌 330013;2.南昌工程学院工商管理学院,江西 南昌 330099)

摘要:针对单一生产商和单一销售商组成的 2 级再制造闭环供应链,考虑生产商的绿色投入水平和回收商的回收努力程度,分别在生产商回收和销售商回收 2 种模式下,构建生产商主导的 Stackelberg 动态博弈,分析在不同回收商角色下生产商和销售商的定价、绿色工艺投入和回收努力投入的最优决策方案及各自利润的变化.研究结果表明:1) 生产商对绿色工艺的投入不受回收商角色的影响;2) 当生产商回收时,回收努力程度与生产全新产品与回收再制造产品的成本差呈正相关关系;当销售商回收时,回收努力程度与回收单位产品获利呈正相关关系;3) 在销售商回收时生产商获利更多,这说明生产商会优先选择将回收工作委托给销售商.研究验证了改进绿色生产工艺和提高回收率是实现废旧产品循环利用的重要手段,这可以为生产商和销售商的价格制定、绿色工艺投入和回收努力投入的决策提供参考.

关键词:再制造闭环供应链;绿色工艺投入;回收努力;定价决策

中图分类号:Q 948.5 **文献标志码:**A **DOI:**10.16357/j.cnki.issn1000-5862.2023.06.03

0 引言

绿色供应链是一种综合考虑环境效益和经济效益的现代供应链管理新模式,其主要内容涉及绿色采购、绿色制造、绿色销售、绿色消费、绿色回收以及绿色物流等供应链各个环节,其目的在于实现资源利用率最大化和环境污染最小化.绿色制造和回收是其中 2 个较为重要的环节,分别从生产过程和资源循环利用 2 个角度实现供应链的绿色化.绿色制造相较于常规生产方法能显著节约能源和资源,同时减少对人体伤害和环境污染.绿色回收考虑产品、零部件及包装等的回收处理成本与回收价值.随着经济与环境协调发展管理理念的普及,现代企业越来越重视绿色供应链管理与实践.消费者群体环

保意识的逐渐提高使得产品整个生命周期的绿色度越来越受到关注,具有低消耗、低污染特点的产品将受到更多的青睐,绿色产品的需求日益增长.然而,实施绿色制造和回收工作面临着高成本的障碍,绿色制造要求投入大量资金进行新工艺的研发和设备的改进^[1],绿色回收也需要投入高额的成本进行宣传动员、废旧产品拆解分类等.如柯达、IBM 和 Xerox 等部分大型生产商选择通过自身回收渠道进行产品回收;Best Buy 采用销售商回收模式.在绿色发展战略下,如何确定最佳的绿色生产和回收方案,达到经济效益和环境效益之间的平衡,是各大制造企业需要解决的问题.因此,本文着重考虑绿色制造和回收 2 个环节:一方面是从产品本身的绿色工艺投入水平出发,加大绿色工艺的投入力度,降低产品生产及使用整个生命周期对环境的负面影

收稿日期:2023-08-20

基金项目:国家自然科学基金(72162018)和江西省研究生创新专项资金(YC2020-B038,YC2022-B154)资助项目.

作者简介:柳 键(1964—),男,湖南浏阳人,教授,博士,博士生导师,主要从事物流与供应链管理研究.E-mail:liujian3816@263.net

响;另一方面考虑废旧产品的循环利用,尽可能多地回收废旧产品以实现资源的最大效用和减少废弃物对环境的污染。

目前,关于供应链产品回收管理问题的研究主要集中在2个方面。一是基于再生产的闭环供应链回收渠道管理问题。R.C. Savaskan 等^[2]研究了在分散式决策的闭环供应链中的3种回收方式:生产商回收、销售商回收和第3方回收,研究表明离消费市场更近的销售商回收模式更优。随后,R.C. Savaskan 等^[3]又研究了在具有竞争销售商的闭环供应链模型下回收渠道的选择问题,将回收渠道分为直接回收及间接回收2种方式,发现直接回收模式主要受回收规模的影响,而间接回收模式主要受到供应链竞争行为的影响。黄祖庆等^[4]在文献[2-3]的基础上,考虑了在正向供应链中的集中式决策和分散式决策,进而将闭环供应链的回收渠道分为5种,并分别研究了在这5种回收渠道下的闭环供应链均衡决策。二是基于再生产的闭环供应链定价问题。S. Ray 等^[5]研究了在以旧换新回收模型下的闭环供应链价格决策问题。M. E. Ketzenberg 等^[6]的研究说明再生产的利润与废旧产品的回收数量和质量都相关,再制造产品定价需要考虑质量的差异性。此外,文献[7-9]分别单独考虑新产品与再制造品价格差异或质量差异,探讨了生产商与零售商的2级再制造闭环供应链最优差别定价问题。洪宪培等^[10]同时研究了闭环供应链定价与回收渠道选择2个问题。曾剑锋等^[11]在碳减排背景下讨论碳税对闭环供应链主体的生产和回收策略的影响情况。王文宾等^[12]考虑由多主体构成的闭环供应链在制造商分担投资成本情况下各供应链成员的决策问题。梁喜等^[13]在碳总量控制与交易机制下考虑不同CSR投入的闭环供应链回收与减排决策等问题。闫彦超等^[14]研究了在多渠道闭环供应链下当制造商与服务商收益共享时的回收定价与最优服务水平决策等问题。

近年来,国内外学者在绿色供应链管理方面的研究成果比较丰富,多集中在绿色供应链评价、产品定价决策和协调策略研究等方面。文献[15-16]研究政府补贴对供应链成员进行绿色技术创新有一定的激励作用。文献[17-19]通过设计收益共享契

约、批发价契约、成本分担契约和两部制契约等促进绿色供应链上下游企业的协调与合作。曾剑锋等^[20]考虑由1个制造商和1个零售商构成的绿色供应链,分析其决策受零售商风险厌恶程度和供应链模式的影响情况。游达明等^[21]研究制造商与零售商的绿色生态研发努力和促销努力,对提高绿色供应链的产出有较大促进作用。关志民等^[22]通过设计双向成本分担契约,研究制造商与供应商的绿色协同创新。刘丽等^[23]引入绿色技术,通过构建由1个供应商和2个制造商组成的供应链,研究绿色技术创新对研发投入决策的影响机制。

已有文献为再制造闭环供应链决策提供了借鉴和思路,但可以看出较少研究同时关注产品生产的绿色投入水平和回收努力程度对需求的影响,以及在此背景下研究闭环供应链决策和生产销售商的利润获取情况。因此,本文以再制造闭环供应链为研究对象,针对生产商主导的渠道结构,综合考虑绿色工艺投入水平和回收努力程度2个因素,深入分析回收模式的变化对批发价、零售价、生产商绿色投入、回收商的回收努力投入、以及生产商和销售商利润的影响,最终确定最优回收模式。

1 问题描述及模型基本假设

1.1 问题描述

本文考虑由生产商(manufacturer)、销售商(seller)和消费者(consumer)构成的再制造闭环供应链。在这个闭环供应链中,全新产品的生产和废旧产品的再生产均由生产商负责,销售商负责销售产品,废旧产品可以由生产商自行回收或者委托销售商进行回收,在这2种回收模式下闭环供应链的结构和运作流程分别如图1和图2所示。为了充分地节约成本,生产商首选将回收的产品进行加工生产。在一般情况下,由于再生产的产品数量不能满足市场需求,所以生产商应同时会使用原材料生产全新产品。实际上,生产商和销售商的交易过程遵从Stackelberg主从博弈规则,本文假设生产商作为Stackelberg博弈的领导者角色,销售商为追随者。

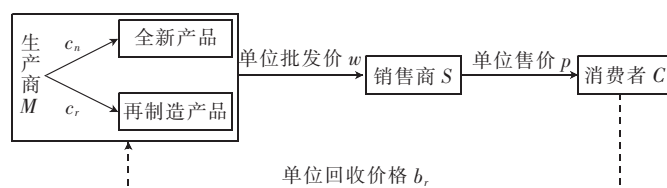


图1 在生产商回收模式下闭环供应链结构示意图

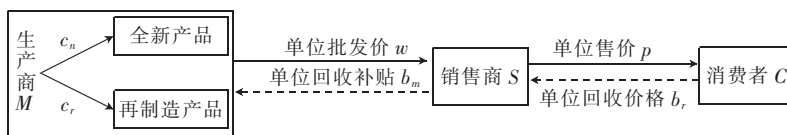


图2 在销售商回收模式下闭环供应链结构示意图

1.2 基本假设

为了确保研究的科学性和针对性,本文结合现实情况提出如下基本假设:

1) 在闭环供应链中各成员企业均为理性人,风险中性,且成员企业间信息完全透明.只考虑在单周期阶段下闭环供应链的决策.

2) 假设新产品与再制造产品在出厂时无任何质量和外观差异,即消费者对新产品和再制造产品的接受程度是一样的.因此对新产品和再制造产品不进行区别销售,生产商以统一批发价 w 批发给销售商,销售商以零售价 $p(p > w > 0)$ 出售给消费者.

3) 产品的市场需求函数 D 是线性的,且与绿色工艺投入水平 g 和对废旧产品的回收努力程度 θ 相关.参照文献[24]可设 $D = a - \beta p + \gamma g + \delta \theta$, 且 $a > \beta p > 0$, $\beta > \gamma > 0$, $\beta > \delta > 0$, 其中 a 表示潜在的市场需求量, $\beta(\beta > 0)$ 是需求对价格的敏感系数, $g(0 \leq g \leq 1)$ 表示绿色工艺投入水平, $\gamma(\gamma > 0)$ 表示绿色工艺投入水平对该产品的市场需求量的影响, $\theta(0 \leq \theta \leq 1)$ 是销售商的回收努力程度,用废旧产品的回收率表示, $\delta(\delta > 0)$ 表示回收努力程度对需求量的影响.此需求函数表明产品的市场需求量与产品的售价负相关,而与生产商的绿色生产水平和回收商的回收努力程度呈正相关. $a > \beta p > 0$ 保证了需求总是为正的, $\beta > \gamma > 0$, $\beta > \delta > 0$ 表示价格对需求的影响大于绿色工艺投入水平及回收努力程度对需求的影响.

4) 忽略回收产品的新旧程度差异性,将回收产品的再制造单位成本设为 c_r .生产单位新产品的成本设为 c_n .基于环保意义的考虑,假设生产新产品的成本高于再制造产品的成本,即 $c_n > c_r > 0$.单位产品的平均生产成本表示为 $c = (1 - \theta)c_n + \theta c_r$.

5) 产品的单位回收价格为 b_r ,生产商在委托销售商回收废旧产品时需要支付给销售商的单位回收补贴为 b_m .为了使得生产商和销售商都在回收-再制造环节中有利可图,需要满足 $b_r \leq b_m \leq c_n - c_r$.为了方便书写,不妨设 $\Delta_c = c_n - c_r - b_r$, $\Delta_s = b_m - b_r$, 且 $\Delta_c > \Delta_s > 0$, $b_r \leq b_m \leq c_n - c_r$, Δ_c 表示生产单位新产品与回收再制造单位产品的成本之差, Δ_s 表示销售商回收单位废旧产品的获利.

6) 生产商对绿色工艺的投入水平越高,生产成

本越高.生产商对绿色工艺的单位投入成本为 c_g , 参照文献[25],假设 c_g 为绿色工艺投入水平的2次函数,即有 $c_g = kg^2$, 其中 k 为绿色成本系数.

7) 回收商对废旧产品回收的投资成本 c_i 越高,回收努力程度 θ 越高.投资成本指的是回收商为了回收更多的废旧产品而付出的广告宣传和人力物力成本.鉴于回收投资成本与回收努力程度的正向变动关系,参照文献[26],假设 $c_i = l\theta^2$, 其中 l 为投资规模系数,并且 $l > (\Delta_s \beta + \delta)^2 / (4\beta)$ (这确保利润函数的Hesse矩阵的负定性).

2 在2种回收模式下的闭环供应链决策模型

生产商直接回收有诸多优点:1) 生产商接触终端消费者,收集用户在产品使用方面的信息,从而能够更加有针对性地对产品进行改进;2) 可以节省再生产成本、提高生产效率.生产商在回收时可以更清楚地了解回收的废旧产品在数量和质量方面的情况,以便对回收产品进行专门处理;3) 有利于塑造环保企业的良好形象,从而提高企业的竞争力.然而,并非所有的生产商都能够胜任回收的任务.整个回收过程的管理是相当复杂的,要求生产商具备一定的经济实力和协同管理能力,能够在回收废旧产品的同时不影响其新产品的正常生产.因此,很多生产商将回收的工作委托给销售商或者专门发展回收业务的第3方回收公司,回收商角色的不同产生了不同的回收模式.本文仅讨论供应链上下游的生产商与销售商之间的合作关系,不考虑第3方回收商参与的情形,接下来分别对在生产商回收(M)和销售商回收(S)2种模式下的定价决策进行建模和分析.

2.1 生产商回收模式(M 模式)

在生产商回收模式下,生产商需要建立专门的回收渠道,以单位回收价格 b_r 回收废旧产品,然后统一管理.生产商肩负新产品的生产、废旧产品的回收以及废旧产品的再生产这3项任务.由于销售商只负责产品的销售,所以生产商不需要支付废旧产品的回收补贴.

在此Stackelberg博弈中,生产商作为领导者,首

先决定单位产品的批发价 w^M 、绿色工艺投入水平 g^M 和回收努力程度 θ^M , 而销售商参考生产商的价格决策制定零售价 p^M . 此时, 该闭环供应链各成员企业的利润函数如下: 生产商的利润 π_m^M 为

$$\pi_m^M = D(w^M - c) - b_r \theta^M D - c_g - c_t = (a - \beta p^M + \gamma g^M + \delta \theta^M)(w^M - c - b_r \theta^M) - c_g - c_t,$$

销售商的利润 π_s^M 为

$$\pi_s^M = D(p^M - w^M) = (a - \beta p^M + \gamma g^M + \delta \theta^M)(p^M - w^M).$$

在上述利润函数中, π_m^M 是关于变量 w^M 、 g^M 和 θ^M 的严格联合凹函数, π_s^M 是关于变量 p^M 的严格联合凹函数, 它们均存在唯一解. 利用逆向归纳法进行求解, 可以获得各成员企业的最优决策方案和最优利润, 具体决策问题如下:

$$\max_{w^M, g^M, \theta^M} (\pi_m^M), \text{ s.t. } \max_{p^M} (\pi_s^M). \quad (1)$$

对决策式(1)进行求解可得在生产商回收模式下, 生产商和销售商的最优决策分别为

$$w^M = a / (2\beta) + c_n / 2 + 3\gamma^2 / (8k\beta^2) + (\delta^2 - \Delta_c^2 \beta^2) (a - \beta c_n + \gamma^2 / (4k\beta)) / (2\beta(8l\beta - (\Delta_s \beta + \delta)^2)),$$

$$p^M = 3a / (4\beta) + c_n / 4 + 7\gamma^2 / (16k\beta^2) + (3\delta^2 + 2\delta\beta\Delta_c - \Delta_c^2 \beta^2) (a - \beta c_n + \gamma^2 / (4k\beta)) / (4\beta(8l\beta - (\Delta_s \beta + \delta)^2)),$$

$$g^M = \gamma / (2k\beta), \theta^M = (\beta\Delta_c + \delta) (a - \beta c_n + \gamma^2 / (4k\beta)) / (8l\beta - (\Delta_s \beta + \delta)^2).$$

因此, 在生产商回收模式下, 生产商、销售商和供应链总利润分别为

$$\pi_m^M = l (a - \beta c_n + \gamma^2 / (4k\beta))^2 / (8l\beta - (\Delta_s \beta + \delta)^2),$$

$$\pi_s^M = 4l^2 ((a - \beta c_n + \gamma^2 / (4k\beta))^2 / (8l\beta - (\Delta_s \beta + \delta)^2))^2,$$

$$\pi^M = (4l^2 + 8l^2 \beta - (\Delta_s \beta + \delta)^2) ((a - \beta c_n + \gamma^2 / (4k\beta))^2 / (8l\beta - (\Delta_s \beta + \delta)^2))^2.$$

2.2 销售商回收模式(S模式)

在委托销售商回收的情况下, 生产商可以专注于新产品的研发和生产, 提高自身核心竞争力. 销售商可以利用其销售渠道进行回收, 单位回收价格为 b_r , 并将回收的废旧产品统一交付给生产商进行再生产. 此时, 生产商需要支付废旧产品的回收补贴 b_m 给销售商, 从而销售商除了销售新产品获利外, 还可以从回收废旧产品的过程中获得相应的利润, 即回收每件废旧产品获利 $\Delta_s = b_m - b_r$.

同样地, 生产商首先决定单位产品的批发价 w^S 和绿色工艺投入水平 g^S , 而销售商参考生产商的价格决策制定零售价 p^S 和回收努力程度 θ^S . 此时, 该闭环供应链各成员企业的利润函数如下: 生产商的利润 π_m^S 为

$$\pi_m^S = D(w^S - c) - b_m \theta^S D - c_g = (a - \beta p^S + \gamma g^S + \delta \theta^S) \cdot$$

$$(w^S - c - b_m \theta^S) - c_g.$$

销售商的利润 π_s^S 为

$$\pi_s^S = D(p^S - w^S) + \Delta_s \theta^S D - c_t = (a - \beta p^S + \gamma g^S + \delta \theta^S) \cdot ((p^S - w^S) + \Delta_s \theta^S) - c_t.$$

在上述利润函数中, π_m^S 是关于变量 w^S 和 g^S 的严格联合凹函数, π_s^S 是关于变量 p^S 和 θ^S 的严格联合凹函数, 它们均存在唯一解. 利用逆向归纳法进行求解, 可以获得各成员企业的最优决策方案和最优利润, 具体决策问题如下:

$$\max_{w^M, g^M} (\pi_m^M), \text{ s.t. } \max_{p^M, \theta^M} (\pi_s^M).$$

在销售商回收模式下, 生产商和销售商的最优决策为

$$w^S = (a + \gamma^2 / (2k\beta)) / \beta - (4l\beta - (\Delta_s \beta + \delta)^2) (a - \beta c_n + \gamma^2 / (4k\beta)) / (2\beta(4l\beta - (\Delta_s \beta + \delta)((\Delta_s + \Delta_c)\beta + \delta))),$$

$$p^S = (a + \gamma^2 / (2k\beta)) / \beta - (8l\beta - 2(\Delta_s \beta + \delta)^2 - \Delta_s^2 \beta^2) (a - \beta c_n + \gamma^2 / (4k\beta)) / (4\beta(4l\beta - (\Delta_s \beta + \delta)((\Delta_s + \Delta_c)\beta + \delta))),$$

$$g^S = \gamma / (2k\beta), \theta^S = (\Delta_s \beta + \delta) (a - \beta c_n + \gamma^2 / (4k\beta)) / (2\beta(4l\beta - (\Delta_s \beta + \delta)((\Delta_s + \Delta_c)\beta + \delta))).$$

因此, 在销售商回收模式下, 生产商、销售商和供应链总利润分别为

$$\pi_m^S = l (a - \beta c_n + \gamma^2 / (4k\beta))^2 / (8l\beta - 2(\Delta_s \beta + \delta)^2 - 2\Delta_s \beta(\Delta_s \beta + \delta)),$$

$$\pi_s^S = l (4l\beta - (\Delta_s \beta + \delta)^2) ((a - \beta c_n + \gamma^2 / (4k\beta))^2 / (4l\beta - (\Delta_s \beta + \delta)^2 - \Delta_c \beta(\Delta_s \beta + \delta)))^2 / 4,$$

$$\pi^S = l (12l\beta - 3(\Delta_s \beta + \delta)^2 - 2\Delta_s \beta(\Delta_s \beta + \delta)) \cdot ((a - \beta c_n + \gamma^2 / (4k\beta))^2 / (4l\beta - (\Delta_s \beta + \delta)^2 - \Delta_c \beta(\Delta_s \beta + \delta)))^2.$$

3 在2种回收模式下的最优决策方案及各成员利润比较

比较在2种回收模式下的最优决策方案和利润, 可以得出如下一些命题.

命题1 生产商对绿色工艺的投入不受回收商角色的影响. 即不论是生产商自行回收还是委托销售商回收, 生产商的最优绿色工艺投入都为 $\gamma / (2k\beta)$, 且与绿色工艺投入水平对价格的敏感程度 γ 呈正相关.

证 对比在2种回收模式下的最优解容易看出 $g^M = g^S = \gamma / (2k\beta)$ ($k > 0, \beta > 0$).

命题1说明: 生产商不论有没有承担回收废旧产品的任务都应始终保持高度的环保意识, 在这2种回收模式下生产商都不能忽视对绿色工艺投入

水平的关注.

命题 2 在 2 种回收模式下, 最优回收努力程度与生产产品和回收再制造产品的成本之差均呈正相关关系.

证 由假设 $l > (\Delta_c \beta + \delta)^2 / 4\beta$ 且 $\Delta_c > \Delta_s > 0$ 得

$$\partial \theta^M / \partial \Delta_c = (8l\beta^2 - \beta(\beta\Delta_c + \delta)^2 + 2\beta(\beta\Delta_c + \delta)^2(a - \beta c_n + \gamma^2 / (4k\beta))) / (8l\beta - (\Delta_c \beta + \delta)^2) > \beta(\beta\Delta_c + \delta)^2(1 + (a - \beta c_n + \gamma^2 / (4k\beta))) / (8l\beta - (\Delta_c \beta + \delta)^2) > 0,$$

所以 θ^M 与 Δ_c 呈正相关关系.

同理, $\partial \theta^S / \partial \Delta_s > 0$, 故 θ^S 与 Δ_s 呈正相关关系.

命题 2 说明: 若回收再制造产品的成本远小于生产全新产品的成本, 则生产商必然更偏好生产再制造产品, 当其自行承担回收任务时, 有动机付出更多的回收努力. 由于 $\Delta_c = c_n - c_r - b_r$, 所以, 若想提高 Δ_c , 一方面生产商可以改进生产工艺以降低生产再制造产品的成本, 另一方面可以积极开展消费者废物循环利用的动员活动, 努力提高消费者的环保意识, 以便降低回收价格. 当销售商回收时, 单位回收产品获利越多越能激起销售商的回收努力意愿. 本文假设 $\Delta_s = b_m - b_r$, 为了提高单位回收产品的获利, 销售商同样需要在回收宣传动员活动上加大力度, 生产商为激励销售商可以酌情增加回收补贴.

命题 3 生产商在将回收任务委托给销售商时的利润高于生产商在自行回收时的利润, 即 $\pi_m^S > \pi_m^M$.

证 由在 2 种模式下生产商最优解可知,

$$\pi_m^M = l(a - \beta c_n + \gamma^2 / (4k\beta))^2 / (8l\beta - (\Delta_c \beta + \delta)^2),$$

$$\pi_m^S = l(a - \beta c_n + \gamma^2 / (4k\beta))^2 / (8l\beta - 2(\Delta_s \beta + \delta)^2 - 2\Delta_c \beta(\Delta_s \beta + \delta)),$$

因为两式分子相等, $l > (\Delta_c \beta + \delta)^2 / 4\beta$ 且 $\Delta_c > \Delta_s > 0$, 所以

$$8l\beta - (\Delta_c \beta + \delta)^2 > (\Delta_c \beta + \delta)^2 > 0, 2(4l\beta - (\Delta_s \beta + \delta)^2 - \Delta_c \beta(\Delta_s \beta + \delta)) > 2\Delta_c \beta(\Delta_s \beta + \delta) > 0, 8l\beta - (\Delta_c \beta + \delta)^2 - (2(4l\beta - (\Delta_s \beta + \delta)^2 - \Delta_c \beta(\Delta_s \beta + \delta))) = 2(\Delta_s \beta + \delta)^2 + 2\Delta_c \beta(\Delta_s \beta + \delta) - (\Delta_c \beta + \delta)^2 > (\Delta_s \beta + \delta)(1 + 2\Delta_c \beta) > 0,$$

因此 $\pi_m^S > \pi_m^M$.

命题 3 说明: 当考虑绿色工艺投入水平以及回收努力程度 2 个因素时, 生产商的利润在销售商回收模式下相对较大. 这说明在生产商主导的闭环供应链中应优先选择委托销售商进行回收.

命题 4 在销售商回收模式中, 当给定回收价格 b_r 时, 生产商利润 π_m^S 、销售商利润 π_s^S 和供应链总利润 π^S 都随着单位回收补贴 b_m 增大而增大, 且最优单位回收补贴为 $c_n - c_r$.

证 由最优解可以容易看出, $\partial \pi_m^S / \partial \Delta_s > 0$, $\partial \pi_s^S /$

$\partial \Delta_s > 0$ 和 $\partial \pi^S / \partial \Delta_s > 0$. 这说明 π_m^S 、 π_s^S 、 π^S 与 Δ_s 呈正相关关系. 因为 $\Delta_s = b_m - b_r$ 且 b_r 是定值, 所以 π_m^S 、 π_s^S 、 π^S 与 b_m 呈正相关关系. 又由假设可知 $b_r \leq b_m \leq c_n - c_r$, 故生产商支付的最优单位回收补贴 $b_m = c_n - c_r$.

命题 4 说明: 生产商没有直接从再生产中获利, 而是将可能的获利全部转移给销售商. 这种结果似乎对生产商不利. 实际上, 生产商增加回收补贴的措施, 一方面会激励销售商降低价格, 从而引起市场需求的增加, 另一方面会提高销售商的回收努力积极性, 提高回收率从而降低生产成本. 因此, 生产商虽然没有从再生产中获利, 但是其利润还是增加的.

4 数值实验

本节将通过数值实验来验证相关命题并分析重要影响因素(绿色投入水平影响因子和回收努力程度影响因子)对最优定价决策、回收努力水平和生产商与销售商最优利润的影响. 参照文献[23], 不失一般性, 假设 $a = 400$, $\gamma = 20$, $\delta = 10$, $\beta = 4$, $c_n = 50$, $c_r = 30$, $k = 300$, $b_r = 10$, $b_m = 15$, $l = 500$ (上述参数值符合前面的假设, 同时除非另有说明, 否则适用于本节的各实验). 首先考虑生产产品与回收再制造产品单位成本之差对回收努力水平的影响, 假设 $\Delta_c \in [6, 15]$ 且步长为 0.5, $\Delta_s \in [1, 8]$ 且步长为 0.5.

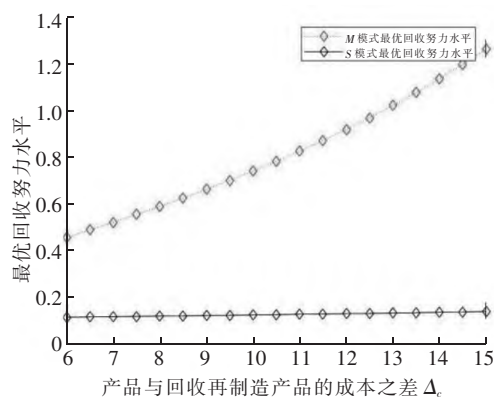
由图 3 可知: 在不同回收模式下生产产品与回收再制造产品单位成本之差与最优回收努力水平呈正相关关系, 且不受回收模式的影响. 该结论进一步验证了命题 2. 这说明不论是生产商还是销售商, 当回收再制造所产生的成本较小时, 能够激发企业提高回收努力水平, 从而增加消费者需求. 这意味着: 企业应该提高回收再制造效率, 努力降低再制造成本, 从而提高自身竞争优势.

其次, 考虑回收努力程度影响因子对最优结果的影响, 假设 $\delta \in [1, 40]$ 且步长为 2.

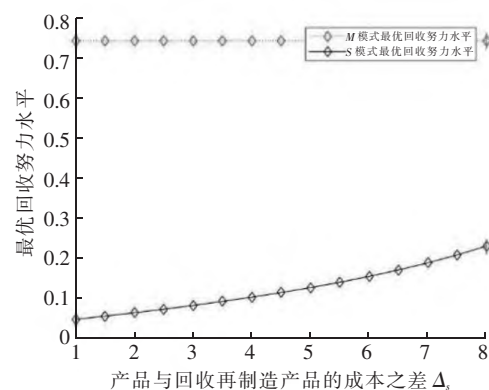
由图 4 可知: 随着回收努力影响因子的增大, 在生产商回收模式下最优批发价和产品销售价逐渐增加, 而在销售商回收模式下最优批发价和产品销售价则逐渐减少. 这表明回收努力影响因子对在不同回收模式下的最优批发价和产品销售价会产生相反的影响, 也就意味着企业可以通过控制回收努力影响定价从而提升自身竞争优势. 同时, 在生产商回收模式下的最优批发价和销售价始终大于在销售商回收模式下的最优批发价和销售价, 且随着回收努力影响因子的增大在 2 种模式下的最优价格相

差越来越大.这表明:当生产商回收产品时,会利用批发价格工具导致市场价格增加,从而压榨消费者剩余而损害消费者福利.此外,相比最优批发价格来说,在2种模式下产品最优销售价相差更大.由图4(b)可知:最优回收努力程度随着回收努力影响因

子的增大而增大,且在生产商回收模式下的回收努力程度始终大于在销售商回收模式下的回收努力程度.这表明企业回收努力程度对需求所产生的效果越大越会激发其提高回收努力程度.

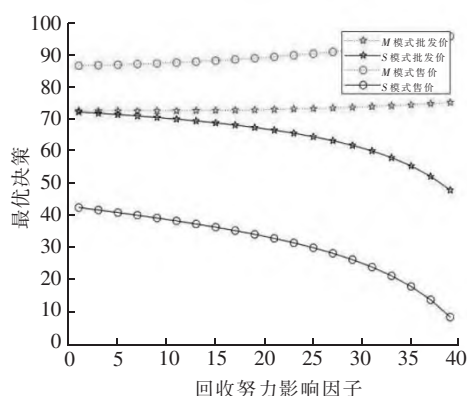


(a) Δ_c 对最优回收努力水平的影响

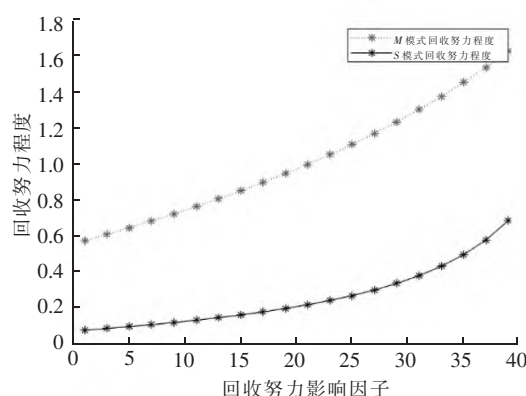


(b) Δ_s 对最优回收努力水平的影响

图3 生产产品与回收再制造产品单位成本之差对最优回收努力水平的影响



(a) 最优定价决策



(b) 回收努力程度

图4 回收努力影响因子对最优定价决策和回收努力程度的影响

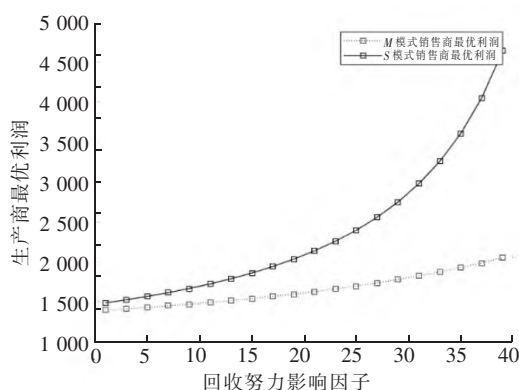
由图5可知:回收努力影响因子对在2种回收模式下生产商和销售商最优利润的影响相同,即回收努力影响因子的增大会增加生产商和销售商的最优利润.也就是说,回收努力程度对需求产生的效果越大越有利于企业的利润,这将激励企业提高回收努力的效果.同时,在销售商回收模式下生产商和销售商的最优利润始终大于在生产商回收模式下的最优利润.而在2种回收模式下销售商的利润均大于生产商的利润.此外,随着回收努力影响因子的增大,生产商和销售商在2种回收模式下最优利润的差距越来越大.同时可以看到,在销售商回收模型下的企业利润受到回收努力程度的影响更加显著,这意味着在该模式下企业更应该关注回收努力对消费者需求产生的效果.

接下来,考虑绿色工艺投入水平影响因子对最优决策的影响,假设 $\gamma \in [1, 600]$ 且步长为 30.

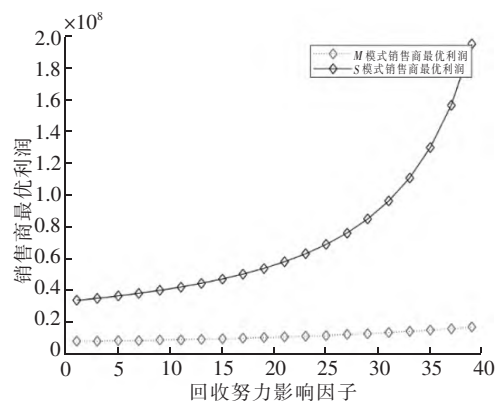
由图6可知:绿色工艺投入水平影响因子对在2种回收模式下最优定价决策和回收努力程度决策的影响相同,即绿色投入工艺水平影响因子的增加会使得最优批发价和销售价提高,以及回收努力程度也会提高.这意味着企业同样可以通过绿色工艺投入水平来间接控制其定价从而获得更多利润.同时,若绿色工艺投入水平对需求产生的效果较大则会激发企业提高其绿色工艺投入水平.在生产商回收模式下的最优批发价和销售价以及回收努力程度始终大于在销售商回收模式下的最优决策,这与图4的结论相同.根据图7同样可以看到,不论是生产商的最优利润还是销售商的最优利润,在销售商回收模式下都可以获得更多利润.图7也可得到在2种回收模式下销售商的利润始终大于生产商的利润,这进一步验证了命题3的结论.同时,绿色工艺投入水平影响因子同样在2种回收模式下能够促进

生产商和销售商的最优利润.这有利于激励企业实

施绿色生产,从而构建绿色供应链保护环境.

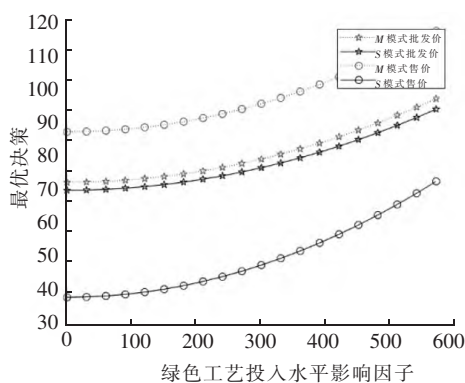


(a) 生产商最优利润

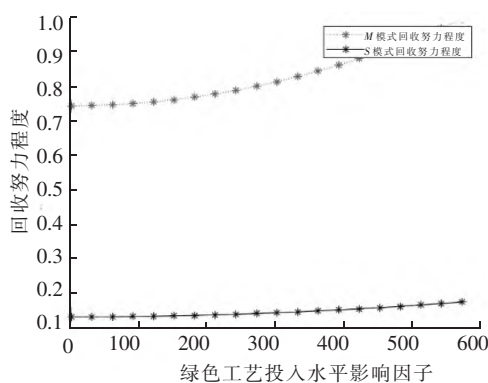


(b) 销售商最优利润

图5 回收努力影响因子对生产商和销售商最优利润的影响

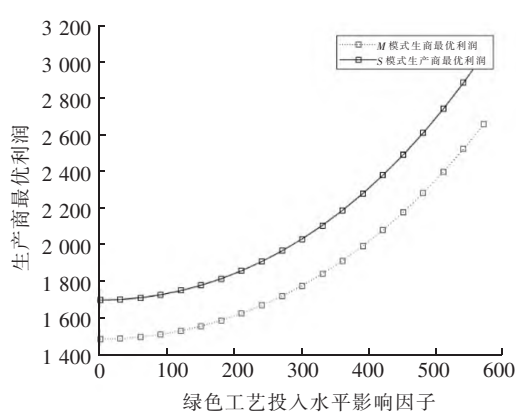


(a) 最优定价决策

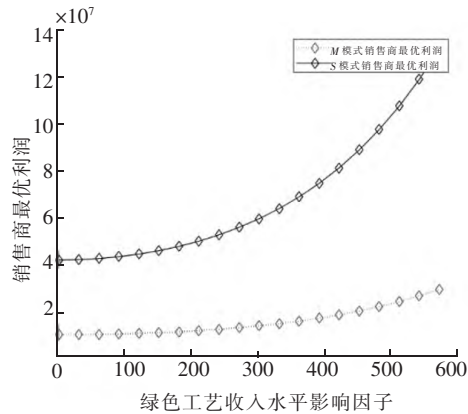


(b) 回收努力程度

图6 绿色工艺投入水平影响因子对最优定价决策和回收努力程度的影响



(a) 生产商最优利润



(b) 销售商最优利润

图7 绿色工艺投入水平影响因子对生产商和销售商最优利润的影响

5 结论与展望

本文在生产商自行回收和委托销售商回收2种模式下,综合考虑生产商的绿色工艺投入水平和回收商的回收努力程度,为生产商和销售商提供较为准确的定价及回收模式决策,以促进生产商和销售商的绿色发展,推进资源全面节约和循环利用.根据研究结果,可以获得如下结论:

- 1) 基于生产商的绿色工艺投入越多和回收商的回收努力程度越大市场需求越大的假设,发现在2种回收模式下生产商在绿色工艺投入上是相同的.
- 2) 当生产商承担回收任务时,回收努力与新产品和再制造产品的成本差呈正相关关系;当销售商回收时,回收努力与回收单位产品获利呈正相关关系.
- 3) 作为个体理性的生产商在选择回收渠道时更倾向于委托销售商回收.
- 4) 决策者应该从改进绿色工艺投入和加大回

收努力2个角度提高企业及供应链的环保责任感,促进企业的绿色发展,以获得绿色偏好消费者和政府部门的青睐和支持。

进一步的研究可以从以下几个方面展开:

1)本文考虑生产商自行回收和销售商回收模式,在现实中部分企业将回收工作委托给第3方回收拆解企业,因此未来考虑第3方公司回收模式可以获得更多重要的结论;

2)本文考虑的是线性需求模型,未来可进一步考虑需求的不确定性,探究在消费者需求不确定性下再制造闭环供应链的定价及回收模式决策;

3)本文仅考虑新产品和再制造产品在销售时无任何差异,未来研究可以将由消费者的环保意识所导致的购买全新产品和再制造产品的偏好差异纳入模型,进一步深化本文的研究结论。

6 参考文献

- [1] 季凯文,罗璐慧.绿色金融促进工业企业绿色转型的作用机理[J].金融教育研究,2022,35(2):35-43.
- [2] SAVASKAN R C, BHATTACHARYA S, VAN WASSENHOVE L N. Closed-loop supply chain models with product remanufacturing [J]. Management Science, 2004, 50(2): 239-252.
- [3] SAVASKAN R C, VAN WASSENHOVE L N. Reverse channel design: the case of competing retailers [J]. Management Science, 2006, 52(1): 1-14.
- [4] 黄祖庆,易荣华,达庆利.第三方负责回收的再制造闭环供应链决策结构的效率分析[J].中国管理科学, 2008, 16(3): 73-77.
- [5] RAY S, BOYACI T, ARAS N. Optimal prices and trade-in rebates for durable, remanufacturable products [J]. Manufacturing & Service Operations Management, 2005, 7(3): 208-228.
- [6] KETZENBERG M E, SOUZA G C, GUIDE V D R. Mixed assembly and disassembly operations for remanufacturing [J]. Production and Operation Management, 2003, 12(3): 320-335.
- [7] 郭亚军,赵礼强,李绍.随机需求下闭环供应链协调的收入费用共享契约研究[J].运筹与管理, 2007, 16(6): 15-20.
- [8] 葛静燕,黄培清.价格相依的闭环供应链渠道选择和协调策略[J].工业工程与管理, 2007, 12(1): 29-34.
- [9] 孙浩,达庆利.基于产品差异的再制造闭环供应链定价与协调研究[J].管理学报, 2010, 7(5): 733-738.
- [10] 洪宪培,王宗军,赵丹.闭环供应链定价模型与回收渠道选择决策[J].管理学报, 2012, 9(12): 1848-1855.
- [11] 曾剑锋,柳键.碳减排背景下闭环供应链生产与回收策略研究[J].江西师范大学学报(自然科学版), 2015, 39(5): 536-544.
- [12] 王文宾,范玲玲,杨斯奇,等.制造商分担回收投资成本对闭环供应链决策的影响[J].统计与决策, 2018, 34(18): 57-61.
- [13] 梁喜,魏晨光.不同CSR投入下闭环供应链回收与减排决策[J].计算机集成制造系统, 2022, 28(12): 3993-4010.
- [14] 闫彦超,马祖军.“线上销售/回收+线下服务”的闭环供应链定价与服务决策[J].中国管理科学, 2022, 30(1): 175-184.
- [15] 曹裕,李青松,胡韩莉.不同政府补贴策略对供应链绿色决策的影响研究[J].管理学报, 2019, 16(2): 297-305, 316.
- [16] LI Bin, CHEN Weichun, XU Chuanchao, et al. Impacts of government subsidies for environmental-friendly in a dual-channel supply chain [J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 171(2): 1558-1576.
- [17] 江世英,李随成.考虑产品绿色度的绿色供应链博弈模型[J].中国管理科学, 2015, 23(6): 169-176.
- [18] XU Xiaoping, HE Ping, XU Hao, et al. Supply chain coordination with green technology under cap-and-trade regulation [J]. International Journal of Production Economics, 2017, 183: 433-442.
- [19] 周艳菊,胡凤英,周正龙.零售商主导下促进绿色产品需求的联合研发契约协调研究[J].管理工程学报, 2020, 34(2): 194-204.
- [20] 曾剑锋,柳键.主导模式与风险厌恶对绿色供应链决策的影响研究[J].江西师范大学学报(自然科学版), 2017, 41(2): 204-211.
- [21] 游达明,朱桂菊.低碳供应链生态研发、合作促销与定价的微分博弈分析[J].控制与决策, 2016, 31(6): 1047-1056.
- [22] 关志民,曲优,赵莹.考虑决策者失望规避的供应链协同绿色创新动态优化与协调研究[J].运筹与管理, 2020, 29(5): 96-107.
- [23] 刘丽,韩同银,金浩.基于绿色技术创新和制造商竞争的绿色供应链微分博弈研究[J].管理学报, 2023, 20(1): 116-126.
- [24] LI Guo, TIAN Lin, ZHENG Hong. Information sharing in an online marketplace with co-opetitive sellers [J]. Production and Operations Management, 2021, 30(10): 3713-3734.
- [25] 高举红,韩红帅,侯丽婷,等.考虑绿色工艺投入水平和销售努力的零售商主导型闭环供应链决策研究[J].管理评论, 2015, 27(4): 187-196.
- [26] 覃艳华,曹细玉,陈本松.努力弹性系数与成本同时扰动的闭环供应链协调应对研究[J].中国管理科学, 2015, 23(5): 41-47.

The Decision-Making of Remanufacturing Closed-Loop Supply Chain Considering Green Process Input and Recycling Effort

LIU Jian¹, XIE Jun^{1,2}

(1.School of Information Technology,Jiangxi University of Finance and Economic,Nanchang Jiangxi 330013,China;

2.School of Business Administration,Nanchang Institute of Technology,Nanchang Jiangxi 330099,China)

Abstract: For a remanufacturing closed-loop supply chain composed of the manufacturer and the distributor, considering the green process input and recycling effort, the two-stage Stackelberg game models dominated by the manufacturer are established under the two modes of the manufacturer recycling and the distributor recycling, thus analyzing the optimal decision-making of pricing, green process inputs, recycling efforts, and the profits. The results show that no matter who takes on recycling, the manufacturer should make great effort to improve its greenness of products. When the manufacturer recycles, the level of recycling effort is positively related to the cost difference between the production of new products and the remanufactured products. When the distributor recycles, the level of recycling effort is positively related to the compensation of unit recycling product. The manufacturer can gain more profit when the seller recycles, indicating that the manufacturer may prefer to entrust the recycling work to the seller. The research proves that improving the green production process and the recycling rate are important means to realize the recycling of waste products, and can provide reference for the decision-making of producers and distributors for price decision, green process investment and recycling efforts.

Key words: remanufacturing closed-loop supply chain; green process input; recycling effort; pricing

(责任编辑:曾剑锋)

(上接第 557 页)

The Efficient Legendre-Galerkin Approximation Based on Mixed Schemes for Fourth-Order Equations

WEI Tao, AN Jing*

(School of Mathematical Sciences, Guizhou Normal University, Guiyang Guizhou 550025, China)

Abstract: In this paper, the efficient Legendre-Galerkin approximation based on a mixed scheme is proposed for fourth-order equations. Firstly, by introducing an auxiliary function, the original problem is transformed into an equivalent second-order mixed scheme. Secondly, by introducing a class of suitable Sobolev spaces and their approximation spaces, the weak forms of the second-order mixed scheme and the corresponding discrete scheme are established. Then by using the approximation properties of orthogonal projection operators in non-uniform weighted Sobolev spaces, the error estimates of the approximation solutions is proved. In addition, the orthogonality of Legendre polynomials is used to construct a set of appropriate basis functions of the approximation space, so that the mass matrix and stiffness matrix in the discrete mixed variational form are all sparse, which can be quickly solved by using the conjugate gradient method. Finally, some numerical examples are given, and the numerical results show the effectiveness and high precision of our algorithm.

Key words: fourth order problem; mixed scheme; Legendre-Galerkin approximation; error estimation

(责任编辑:曾剑锋)