

基于回收产品质量水平的闭环供应链渠道选择模型

周雄伟, 熊花伟[†], 陈晓红

(中南大学 商学院, 长沙 410083)

摘要: 基于回收努力和回收产品质量水平的考虑,应用 Stackelberg 博弈模型理论,构建分别由制造商回收、零售商回收和第三方回收的3种再制造闭环供应链决策模型,考察不同渠道下参与主体最优决策差异和基于回收产品质量水平的回收渠道选择问题.结果表明,第三方回收为下策均衡,制造商回收或零售商回收取决于产品再制造成本的节约水平,制造商需衡量其再制造成本,从制造商回收和零售商回收中选择最优的回收渠道.

关键词: 回收质量; 回收努力; 闭环供应链; 渠道选择; Stackelberg 博弈

中图分类号: TP273

文献标志码: A

Reverse channel selection in closed-loop supply chain based on quality of recycled products

ZHOU Xiong-wei, XIONG Hua-wei[†], CHEN Xiao-hong

(School of Business, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: Considering the collection effort and the quality of recycled products, based on the Stackelberg game theory, this paper constructs three different channel decision models in remanufacturing closed-loop supply chain, which are manufacturer collecting, retailer collecting and third party(3P) collecting. By the models, the differences of the optimal decision-making among channel participants and the recycling channel selection issue are studied. The results show that the third party collecting is the worst equilibrium. In addition, recycling by manufacturers or retailers depends on the cost savings level of remanufacturing. Therefore, the manufacturers should choose the best recycling channel from manufacturer collecting and retailer collecting by measuring the cost of remanufacturing.

Keywords: recycled quality; collection effort; closed-loop supply chain; reverse channel selection; Stackelberg game

0 引言

随着现代科技的高速发展和消费者需求的多样化,产品更新换代的速度越来越快,生命周期越来越短,被人们淘汰和废弃的产品急剧增加.但与此同时,地球资源日益减少,人们对可持续发展的呼声越来越高.作为实现可持续发展的主要途径,废旧产品的回收再利用、再制造已成为人们关注的热点问题.再制造产品的质量和性能不低于原产品,但其成本只是原产品的50%,可节能60%,节材70%,对环境的不良影响显著降低.据美国钢铁协会的分析报告,美国在钢铁材料报废产品再制造方面已取得显著成果:节约能源47%~74%,减少大气污染86%,减少水污染76%,

减少固体废料97%,节省用水量40%.

对企业而言,将废旧产品进行回收,一方面是制造商需要承担的责任和义务,有助于缓解社会环境问题和资源紧张压力,塑造企业良好形象,提高企业竞争力;另一方面,通过利用废旧产品中的可用资源,对废旧产品价值进行最大限度的开发和利用,可以达到物料增值、节约成本的作用,进而提高企业利润.

因为消费者使用产品的时间、频率和方法等差异,产品的损耗度(零部件的磨损程度、零部件的可再利用程度等)也大有区别.按照产品损耗度的不同,本文将回收产品分成不同的质量水平,回收时产品的损耗程度越低,表明回收产品的质量越高,产品的再利

收稿日期: 2016-01-15; 修回日期: 2016-04-25.

基金项目: 国家自然科学基金项目(71373288); 国家自然科学基金重点项目(71431006); 国家社科基金重大项目(14ZDB136); 教育部人文社科基金项目(13YJAZH146); 教育部博士点基金项目(20120162120044); 湖南省社科基金重点项目(15ZDB67).

作者简介: 周雄伟(1975—),男,副教授,博士生导师,从事物流与供应链管理、行为运作管理、电子商务与营销科学等研究;熊花伟(1992—),女,硕士生,从事物流与供应链管理的研究.

[†]通讯作者. E-mail: xionghwesu@126.com

用水平越高.Rahman等^[1]研究了影响闭环供应链回收运作的原因,其中回收产品的质量是主要影响因素之一,质量差的回收产品对于企业的再制造而言反而会起到负的影响.因此,怎样提高回收产品的质量水平,最大化企业利润,是每个再制造商需要考虑的问题,这也是本文研究的重点所在.

废旧产品回收再制造的巨大环境效应和经济效应,引起了学者们的极大关注,而回收渠道的选择问题一直是学者们研究的热点.Savaskan等^[2]研究了闭环供应链中最优回收渠道的选择问题,分析得出在其假设情形下,零售商回收优于制造商回收或第三方回收.在此基础上,Savaskan等^[3]考虑了零售商之间存在竞争时,制造商对回收渠道的选择问题,研究结果表明,零售商之间竞争程度的大小会在一定程度上对制造商的回收渠道选择决策产生影响.孙嘉轶等^[4]构建了基于回收价格与销售数量的再制造闭环供应链渠道选择模型,研究了两个零售商参与回收、一个零售商参与回收和制造商回收3种情形下供应链成员的最优决策问题. Atasu等^[5]将回收成本分成激励消费者返回废旧产品的投资成本和与回收数量相关的规模经济成本进行研究,分析了回收成本结构对制造商逆向渠道选择的影响. 聂佳佳^[6]研究了零售商信息分享对闭环供应链回收渠道的影响,其认为制造商对回收渠道的选择取决于预测信息精度和回收旧产品价格的高低.付小勇等^[7]在回收市场中双链竞争下4种回收方式的基础上,运用博弈理论方法研究了市场机制下处理商回收渠道选择策略. Hong等^[8]考虑广告对消费者的重大影响,研究了广告对闭环供应链回收渠道选择和回收定价决策的影响.

以上文献都是在需求和回收确定的情形下进行研究,但是与正向物流相比,废旧产品的回收数量与回收质量的不确定性使逆向物流的决策变得更为复杂. Akerlof^[9]以二手车市场为例,论述了质量和不确定性问题,认为质量差异和不确定性的相互作用可以解释某些重要的劳动市场制度. Chen等^[10]基于市场大小、回收数量和回收质量的不确定性,考虑消费者对新产品和再制造产品的不同支付意愿,对两阶段动态闭环供应链进行了设计. Atalay等^[11]将回收产品分成可维修拆解再制造、可分解和需处理3类,研究其对制造商生产新产品的质量水平决策的影响.高举红等^[12]按照回收质量等级和回收商回收处置能力提出3种回收处置情境,研究碳排放对闭环供应链收益波动规律的影响. Mukhopadhyay等^[13]研究了在回收产品质量和需求不确定情形下,再制造系统的最优

采购和生产决策问题. Das等^[14]利用多重线性回归模型,根据新产品中回收材料的占比情况,对不同质量产品的生产方案进行设计.

以上研究都考虑了回收质量的不确定性,但是他们都没有对回收产品的质量水平进行决策和控制. 在相关研究中,学者们普遍认为通过回收努力可提高废旧产品的回收率,如 Savaskan、Wassenhove 和 Atasu 等,但很少有研究考虑提高回收产品质量水平. 本文认为,通过回收方的努力,可以提升回收产品的质量水平. 例如,在消费者购买产品时,向其说明如何更好地对自己所购买的产品进行维护,可使回收产品质量提高. 此外,在固定的周期内,废旧产品的回收率是基本不变的,但可以对消费者购买的产品进行跟踪,在该产品使用达到一定程度或者处于闲置状态一段时间时,给消费者提出回收建议,在条件允许的情况下提供上门回收服务,以缩短产品的回收时间,提高废旧产品的回收质量.

本文在 Savaskan 提出的闭环供应链回收模式的基础上,基于 Stackelberg 博弈模型理论,利用回收努力提高回收产品的质量,构建了在考虑回收产品质量水平情形下的不同渠道废旧产品回收的决策模型,推导出各个渠道下回收产品的最优质量水平. 在此基础上,比较各个渠道的最优回收质量水平、批发价、零售价和供应链成员利润,以判断基于回收产品质量水平的回收渠道选择问题. 研究结果有助于企业确定最优的回收产品质量水平,选择合适的回收渠道,降低制造成本,提高产品收益,增强企业的竞争能力.

1 模型假设与相关概念

本文考虑包含一个制造商和一个零售商的两级供应链,制造商是 Stackelberg 博弈的领导者. 此外,假设供应链成员之间的信息是完全对称的,避开由于信息不对称所带来的决策风险^[15]. 同时,为简化研究过程,更好地反映供应链成员的投资决策问题,本文研究基于单周期,关于多周期的问题将在未来进行研究.

在正向链中, p 为产品的零售价格, w 为产品的单位批发价格, $D(p)$ 为产品的市场需求,是关于产品价格的函数. 根据 Bulow^[16]和 Weng^[17]的研究,假设 $D(p)$ 为一般线性价格需求函数, $D(p) = \alpha - \beta p$, α 表示价格为零时的市场需求, β 表示需求的价格影响因子, $\alpha > 0, \beta > 0, D(p) > 0$.

在逆向链中,按照产品损耗度的不同,本文将回收产品分成不同的质量水平,用 q 表示. 回收时,产品的损耗程度越低,表明回收产品的质量越高、产品的

再利用水平越高, $0 < q < 1$. $A(q)$ 为从消费者手中回收废旧产品的单位回收成本,是关于回收产品质量水平的函数,回收产品的质量越高,从消费者手中回收的成本越高.假设 $A(q) = aq$, a 为回收方愿意为回收产品支付的最大回收价格, $a > 0$. $B(q)$ 为制造商从零售商或者第三方手中回收废旧产品的单位转移价格,是关于回收产品质量水平的函数,回收产品的质量越高,从零售商或者第三方手中回收其的成本越高.假设 $B(q) = bq$, b 为制造商愿意为回收产品支付的最大转移价格, $b > a > 0$. τ 为废旧产品的回收率,为外生变量.

本文中,制造商生产的产品既可以是全部由新材料制造而成的新产品,也可以是利用部分或者全部回收材料制成的再制造产品,再制造产品和新产品对消费者而言是同质的,但生产一个再制造产品所付出的成本要小于完全由新材料制造的产品.根据文献[2,5]的相关研究,假设回收来的废旧产品全部用于再制造, c_m 为新产品的单位生产成本, $c_r(q)$ 为再制造产品的单位生产成本,是关于回收产品质量水平的函数, $c_r(q) < c_m$.此外,对于再制造产品而言,回收产品的质量水平越高,再制造的成本也会越低,假设 $c_r(q) = c_m - c_s q$, c_s 为再制造所能节约的最大成本.

为提高回收产品的质量水平,负责回收废旧产品的一方需要付出许多努力,努力成本记为 I ,表示为提高回收产品质量水平所进行的投资.因为回收产品的质量水平越高,所付出的努力成本也会越高,同时,随着回收产品质量水平的提高,提高单位质量水平的难度会越来越大,相应的努力成本也会越来越高,因此假设 $I(q) = kq^2$, k 为努力成本参数, $k > 0$.与此类似的模型在前人的研究中已被广泛使用,例如:为提高新产品在消费者心目中的认知所使用的广告投资模型^[18];在闭环供应链的相关研究中,为提高废旧产品的回收率而使用的投资模型.

Π_j^i 表示供应链成员 j 在供应链模型 i 中的利润函数, i 包括 C 、 M 、 R 和 $3P$,分别表示集中型供应链、制造商回收、零售商回收和第三方回收4种闭环供应链模型, j 包括 M 、 R 和 $3P$,分别表示制造商、零售商和第三方3个供应链成员; Π^i 表示供应链模型 i 的总利润; D^i 表示供应链模型 i 的总需求.

基于以上假设,将制造商的单位制造成本记为 $c(q) = c_m(1 - \tau) + c_r(q)\tau$,化简得 $c(q) = c_m - \tau qc_s$,再制造产品所节约的单位制造成本为 qc_s .为使再制造过程经济可行,需满足再制造所节约的成本 qc_s 大于回收产品的获取成本 $A(q)$,即 $a < c_s$.将总的回收

成本记为 $C(q) = I + \tau D(q)A(q)$, $\tau D(q)$ 为回收产品的数量,代入得到 $C(q) = kq^2 + a\tau q(\alpha - \beta p)$.此外,因为产品的需求大于零,有 $\alpha > \beta p > \beta c_m$.

2 闭环供应链模型

本文考虑4种闭环供应链模型,制造商和零售商集中决策的集中型闭环供应链模型(模型 C)和回收方不同的3种分散型闭环供应链(制造商回收(模型 M)、零售商回收(模型 R)和第三方回收(模型 $3P$)),如图1所示,实箭头为正向链,虚箭头为逆向链.

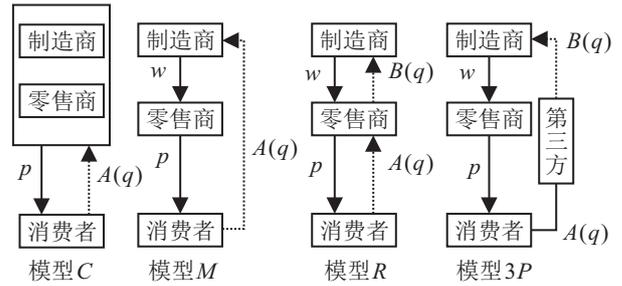


图1 闭环供应链模型

2.1 模型C: 集中型供应链

首先考虑制造商和零售商集中中进行决策的情形,以此作为基础模型与分散型供应链情形进行比较.在集中情形下,供应链只有一个集中决策者,其决定回收产品的质量水平 q 和产品的零售价格 p ,使利润最大化,利润最大模型如下:

$$\max_{p,q} \Pi^C = (\alpha - \beta p)(p - c_m + \tau c_s q) - kq^2 - a\tau q(\alpha - \beta p). \quad (1)$$

对式(1)求解,得到最优回收产品质量水平和零售价分别为

$$q^{*C} = \frac{\tau(\alpha - \beta c_m)(c_s - a)}{4k - \beta\tau^2(c_s - a)^2}, \quad (2)$$

$$p^{*C} = \frac{2\alpha k - \beta[\alpha\tau^2(c_s - a)^2 - 2kc_m]}{\beta[4k - \beta\tau^2(c_s - a)^2]}. \quad (3)$$

为使式(1)的二阶条件大于0,需要满足 $4k - \beta\tau^2(a - c_s)^2 > 0$,即 $k > \beta\tau^2(a - c_s)^2/4$.为确保内部比较的一致性,此条件同时为后3种分散型供应链模型的约束.将式(2)和(3)代入(1),得到

$$\Pi^{*C} = \frac{k(\alpha - \beta c_m)^2}{\beta[4k - \beta\tau^2(c_s - a)^2]}. \quad (4)$$

2.2 模型M: 制造商回收

在该模型中,制造商回收并承担提高回收产品质量水平所付出的投资.制造商决定批发价格和回收产品的质量水平 q 后,零售商决定产品的零售价格 p ,制造商和零售商的目标函数分别为

$$\max_{w,q} \Pi_M^M = (\alpha - \beta p)(w - c_m + \tau c_s q) - kq^2 - a\tau q(\alpha - \beta p), \quad (5)$$

$$\max_p \Pi_R^M = (\alpha - \beta p)(p - w). \quad (6)$$

按照 Stackelberg 博弈模型,先对式(6)求解,得到

$$p^{*M}(w) = \frac{\alpha + \beta w}{2\beta}. \quad (7)$$

将式(7)代入(5),得到

$$\max_{w,q} \Pi_M^M = \frac{\alpha - \beta w}{2}(w - c_m + \tau q c_m) - kq^2 - a\tau q \frac{\alpha - \beta w}{2}. \quad (8)$$

由式(8)得到产品的最优回收产品质量水平、零售价和批发价分别为

$$q^{*M} = \frac{\tau(\alpha - \beta c_m)(c_s - a)}{8k - \beta\tau^2(c_s - a)^2}, \quad (9)$$

$$p^{*M} = \frac{6\alpha k - \beta[\alpha\tau^2(c_s - a)^2 - 2kc_m]}{\beta[8k - \beta\tau^2(c_s - a)^2]}, \quad (10)$$

$$w^{*M} = \frac{4\alpha k - \beta[\alpha\tau^2(c_s - a)^2 - 4kc_m]}{\beta[8k - \beta\tau^2(c_s - a)^2]}. \quad (11)$$

将式(9)~(11)代入(5)和(6),得到

$$\Pi_M^{*M} = \frac{k(\alpha - \beta c_m)^2}{\beta[8k - \beta\tau^2(c_s - a)^2]}, \quad (12)$$

$$\Pi_R^{*M} = \frac{4k^2(\alpha - \beta c_m)^2}{\beta[8k - \beta\tau^2(c_s - a)^2]^2}, \quad (13)$$

$$\Pi^{*M} = \frac{k[12k - \beta\tau^2(c_s - a)^2](\alpha - \beta c_m)^2}{\beta[8k - \beta\tau^2(c_s - a)^2]^2}. \quad (14)$$

2.3 模型 R: 零售商回收

在该模型中,零售商回收并承担提高回收产品质量水平所付出的投资,零售商回收一单位的废旧产品可以从制造商处获得转移价格 B . 在制造商决定批发价格 w 后,零售商决定产品的零售价格 p 和回收产品的质量水平 q , 制造商和零售商的目标函数如下:

$$\max_w \Pi_M^R = (\alpha - \beta p)(w - c_m + \tau c_s q) - b\tau q(\alpha - \beta p), \quad (15)$$

$$\max_{p,q} \Pi_R^R = (\alpha - \beta p)(p - w) + b\tau q(\alpha - \beta p) - kq^2 - a\tau q(\alpha - \beta p). \quad (16)$$

按照 Stackelberg 博弈模型,先对式(16)求解,得到

$$q^{*R}(w) = \frac{\tau(b - a)(\alpha - \beta w)}{4k - \beta\tau^2(b - a)^2}, \quad (17)$$

$$p^{*R}(w) = \frac{2\alpha k - \beta[\alpha\tau^2(b - a)^2 - 2kw]}{\beta[4k - \beta\tau^2(b - a)^2]}. \quad (18)$$

将式(17)和(18)代入(15),得到产品的最优回收产品质量水平、零售价和批发价分别为

$$q^{*R} = \frac{\tau(\alpha - \beta c_m)(b - a)}{8k - 2\beta\tau^2(b - a)(c_s - a)}, \quad (19)$$

$$p^{*R} = \frac{3\alpha k - \beta[\alpha\tau^2(b - a)(c_s - a) - kc_m]}{\beta[4k - \beta\tau^2(b - a)(c_s - a)]}, \quad (20)$$

$$w^{*R} = \frac{4\alpha k - c_m\tau^2\beta^2(b - a)^2}{2\beta[4k - \beta\tau^2(b - a)(c_s - a)]} - \frac{\beta[\alpha\tau^2(b - a)(2c_s - a - b) - 4kc_m]}{2\beta[4k - \beta\tau^2(b - a)(c_s - a)]}. \quad (21)$$

将式(19)~(21)代入(15)和(16),得到

$$\Pi_M^{*R} = \frac{k(\alpha - \beta c_m)^2}{2\beta[4k - \beta\tau^2(b - a)(c_s - a)]}, \quad (22)$$

$$\Pi_R^{*R} = \frac{k(\alpha - \beta c_m)^2[4k - \beta\tau^2(b - a)^2]}{4\beta[4k - \beta\tau^2(b - a)(c_s - a)]^2}, \quad (23)$$

$$\Pi^{*R} = \frac{k[12k - \beta\tau^2(a - b)(3a - b - 2c_s)](\alpha - \beta c_m)^2}{4\beta[4k - \beta\tau^2(b - a)(c_s - a)]^2}. \quad (24)$$

命题 1 当零售商回收时,制造商在 $b = c_s$ 时获得其最大利润.

证明 因为 $\partial \Pi_M^{*R} / \partial b > 0$, 制造商的利润随着 b 的增大而增大,且 $a < b \leq c_s$, 所以当 $b = c_s$ 时,制造商利润最大. \square

这个结果出乎人们的意料,制造商并没有在再制造的过程中获得收入,而是将再制造节约的成本全部转移给了零售商.实际上,在这个闭环供应链中,制造商和零售商都从这个看似反常的决策中获利.对于零售商而言, b 的增加可以带来两方面的好处: 1) 对于一个固定的回收产品质量水平 q , b 的增加会使零售商降低产品的零售价格,从而提高产品的需求,零售商利润增加; 2) 更高的市场需求可以给零售商带来更多的回收产品,同时 b 的增加会激励零售商投入更多的努力来提高回收产品的质量水平,这两方面的作用使得零售商获取更多的回收利润.对于制造商而言,其将再制造节约的成本全部转移给零售商,增加了产品的市场需求,使得制造商正向链利润增加.

2.4 模型 3P: 第三方回收

在该模型中,第三方回收并承担提高回收产品质量水平所付出的投资.先由制造商决定产品的批发价格 w , 然后零售商和第三方分别决策产品的零售价格 p 和回收产品的质量水平 q , 制造商、零售商和第三方的目标函数如下:

$$\max_w \Pi_M^{3P} = (\alpha - \beta p)(w - c_m + \tau c_s q) - b\tau q(\alpha - \beta p), \quad (25)$$

$$\max_{p,q} \Pi_R^{3P} = (\alpha - \beta p)(p - w), \quad (26)$$

$$\max_{p,q} \Pi_{3P}^{3P} = b\tau q(\alpha - \beta p) - kq^2 - a\tau q(\alpha - \beta p). \quad (27)$$

按照 Stackelberg 博弈模型, 先对式(26)求解, 得到

$$p^{*3P}(w) = (\alpha + \beta w)/2\beta. \quad (28)$$

将式(28)代入(27), 得到

$$\max_{p,q} \Pi_{3P}^{3P} = b\tau q \frac{\alpha - \beta w}{2} - kq^2 - a\tau q \frac{\alpha - \beta w}{2}. \quad (29)$$

对式(29)求解, 得到

$$q^{*3P}(w) = (\tau(b - a)(\alpha - \beta w))/4k. \quad (30)$$

将式(28)和(30)代入(25), 得到产品的最优回收产品质量水平、零售价和批发价分别为

$$q^{*3P} = \frac{\tau(b - a)(\alpha - \beta c_m)}{8k - 2\beta\tau^2(b - a)(c_s - b)}, \quad (31)$$

$$p^{*3P} = \frac{3\alpha k - \beta[\alpha\tau^2(b - a)(c_s - b) - kc_m]}{\beta[4k - \beta\tau^2(b - a)(c_s - b)]}, \quad (32)$$

$$w^{*3P} = \frac{2\alpha k - \beta[\alpha\tau^2(b - a)(c_s - b) - 2kc_m]}{\beta[4k - \beta\tau^2(b - a)(c_s - b)]}. \quad (33)$$

将式(31)~(33)代入(25)~(27), 得到

$$\Pi_M^{*3P} = \frac{k(\alpha - \beta c_m)^2}{2\beta[4k - \beta\tau^2(b - a)(c_s - b)]}, \quad (34)$$

$$\Pi_R^{*3P} = \frac{k^2(\alpha - \beta c_m)^2}{\beta[4k - \beta\tau^2(b - a)(c_s - b)]^2}, \quad (35)$$

$$\Pi_{3P}^{*3P} = \frac{k\tau^2(b - a)^2(\alpha - \beta c_m)^2}{4[4k - \beta\tau^2(b - a)(c_s - b)]^2}, \quad (36)$$

$$\Pi^{*3P} = \frac{k[12k + \beta\tau^2(b - a)(3b - a - 2c_s)](\alpha - \beta c_m)^2}{4\beta[4k - \beta\tau^2(b - a)(c_s - b)]^2}. \quad (37)$$

命题2 当第三方回收时, 制造商在 $b = (a + c_s)/2$ 时获得其最大利润。

证明 因为当 $b < (a + c_s)/2$ 时, $\partial\Pi_M^{*3P}/\partial b > 0$, 制造商的利润随着 b 的增大而增大; 当 $b > (a + c_s)/2$ 时, $\partial\Pi_M^{*3P}/\partial b < 0$, 制造商的利润随着 b 的增大而减小, Π_M^{*3P} 为 $b \in [a, c_s]$ 上的凹函数, 所以当 $b = (a + c_s)/2$ 时, 制造商利润最大。□

在模型 3P 中, 制造商只能通过转移价格 b 来激励第三方回收更高质量的产品。对于制造商而言, 提高转移价格 b 会使得第三方回收更高质量的废旧产品, 但同时制造商再制造的优势减弱 ($c_s - b$ 减少), 因此在权衡这两方面的利弊后, 制造商将最大转移价格 b 定为 $(a + c_s)/2$ 使其利润最大。

由命题 1 和命题 2 可见, 转移价格 b 在零售商回收和第三方回收中发挥的作用是不完全相同的。在零售商回收中, 通过 b , 制造商再制造节约的成本最终转化为正向链产品需求的增加; 在第三方回收中, b 仅是制造商的一个直接成本。因此, 正向链的价格决策也是制造商进行回收渠道选择决策的一个重要依据。

命题3 在这 4 种闭环供应链模型中, 回收产品的质量水平与回收率、再制造节约成本成正比, 与努力成本系数、产品回收价格成反比。在零售商和第三方回收模型中, 回收产品的质量水平与回收产品转移价格成正比。

证明 在集中型闭环供应链模型中, 因为

$$\frac{\partial q^{*C}}{\partial \tau} = \frac{(c_s - a)(\alpha - \beta c_m)[\beta\tau^2(c_s - a)^2 + 4k]}{[4k - \beta\tau^2(c_s - a)^2]^2} > 0,$$

所以回收产品的质量水平与回收率成正比; 因为

$$\frac{\partial q^{*C}}{\partial c_s} = \frac{\tau(\alpha - \beta c_m)[\beta\tau^2(c_s - a)^2 + 4k]}{[4k - \beta\tau^2(c_s - a)^2]^2} > 0,$$

回收产品质量水平与再制造节约成本成正比; 因为

$$\frac{\partial q^{*C}}{\partial k} = -\frac{4\tau(\alpha - \beta c_m)(c_s - a)}{[4k - \beta\tau^2(c_s - a)^2]^2} < 0,$$

回收产品质量水平与回收努力成本系数成反比; 因为

$$\frac{\partial q^{*C}}{\partial a} = -\frac{\tau(\alpha - \beta c_m)[\beta\tau^2(c_s - a)^2 + 4k]}{[4k - \beta\tau^2(c_s - a)^2]^2} < 0,$$

可得回收产品质量水平与产品回收价格成反比。同理可证, 在 3 种分散型闭环供应链模型中, 有

$$\frac{\partial q^*}{\partial \tau} > 0, \quad \frac{\partial q^*}{\partial c_s} > 0, \quad \frac{\partial q^*}{\partial k} < 0, \quad \frac{\partial q^*}{\partial a} < 0.$$

另外, 在零售商回收时, 因为

$$\frac{\partial q^{*R}}{\partial b} = \frac{2\tau k(\alpha - \beta c_m)}{[4k - \beta\tau^2(b - a)(c_s - a)]^2} > 0,$$

回收产品的质量水平与回收产品转移价格成正比。第三方回收时, 有

$$\frac{\partial q^{*3P}}{\partial b} = \frac{\tau(\alpha - \beta c_m)[4k - \beta\tau^2(b - a)^2]}{2[4k - \beta\tau^2(b - a)(c_s - b)]^2} > 0,$$

故回收产品质量水平与回收产品转移价格成正比。□

随着回收率的增加, 回收产品的质量水平也会增加, 这是因为回收率增加为回收方带来的利润足以弥补因提高回收产品质量水平所付出的努力成本, 提高回收产品质量有利可图。再制造过程可节约成本的增加会使得回收产品的质量水平提高, 这是因为当制造商回收时, 节约的制造成本可弥补因提高质量水平所付出的成本。而制造商回收产品转移价格的增加可激

励零售商回收更高质量的产品,使得回收产品的质量水平增加.但是,努力成本系数 k 越大,提高回收产品质量所付出的成本便会越高,回收方获得的利润难以将其弥补,所以回收产品的质量水平会降低.此外,当从消费者手中获取废旧产品的回收成本增大时,回收方的成本增加,为提高回收产品质量所付出的努力成本减少,回收产品质量水平降低.

命题4 回收产品的质量水平与需求价格弹性系数的关系如下.

1)在集中情形下.

当 $k < \alpha\tau^2(c_s - a)^2/4c_m$ 时,成正比;当 $k > \alpha\tau^2(c_s - a)^2/4c_m$ 时,成反比.

2)在分散情形下.

制造商回收时,当 $k < \alpha\tau^2(c_s - a)^2/8c_m$ 时,成正比;当 $k > \alpha\tau^2(c_s - a)^2/8c_m$ 时,成反比;

零售商回收时,当 $k < \alpha\tau^2(c_s - a)(b - a)/4c_m$ 时,成正比;当 $k > \alpha\tau^2(c_s - a)(b - a)/4c_m$ 时,成反比;

第三方回收时,当 $k < \alpha\tau^2(c_s - b)(b - a)/4c_m$ 时,成正比;当 $k > \alpha\tau^2(c_s - b)(b - a)/4c_m$ 时,成反比.

证明 在集中型闭环供应链模型中,有

$$\frac{\partial q^{*C}}{\partial \beta} = \frac{\tau(c_s - a)[\alpha\tau^2(c_s - a)^2 - 4kc_m]}{[4k - \beta\tau^2(c_s - a)]^2}.$$

当 $k < \alpha\tau^2(c_s - a)^2/4c_m$ 时, $\partial q^{*C}/\partial \beta > 0$,回收产品的质量水平与需求价格弹性系数成正比;当 $k > \alpha\tau^2(c_s - a)^2/4c_m$ 时, $\partial q^{*C}/\partial \beta < 0$,两者成反比.在制造商回收时

$$\frac{\partial q^{*M}}{\partial \beta} = \frac{\tau(c_s - a)[\alpha\tau^2(c_s - a)^2 - 8kc_m]}{[8k - \beta\tau^2(c_s - a)]^2},$$

当 $k < \alpha\tau^2(c_s - a)^2/8c_m$ 时, $\partial q^{*M}/\partial \beta > 0$,回收产品的质量水平与需求价格弹性系数成正比;当 $k > \alpha\tau^2(c_s - a)^2/8c_m$ 时, $\partial q^{*M}/\partial \beta < 0$,两者成反比.在零售商回收时

$$\frac{\partial q^{*R}}{\partial \beta} = \frac{\tau(b - a)[\alpha\tau^2(c_s - a)(b - a) - 4kc_m]}{2[4k - \beta\tau^2(b - a)(c_s - a)]^2},$$

当 $k < \alpha\tau^2(c_s - a)(b - a)/4c_m$ 时, $\partial q^{*R}/\partial \beta > 0$,回收产品的质量水平与需求价格弹性系数成正比;当 $k > \alpha\tau^2(c_s - a)(b - a)/4c_m$ 时, $\partial q^{*R}/\partial \beta < 0$,两者成反比.在第三方回收时

$$\frac{\partial q^{*3P}}{\partial \beta} = \frac{\tau(b - a)[\alpha\tau^2(c_s - b)(b - a) - 4kc_m]}{2[4k - \beta\tau^2(b - a)(c_s - b)]^2},$$

当 $k < \alpha\tau^2(c_s - b)(b - a)/4c_m$ 时, $\partial q^{*3P}/\partial \beta > 0$,回收产品的质量水平与需求价格弹性系数成正比;当 $k > \alpha\tau^2(c_s - b)(b - a)/4c_m$ 时, $\partial q^{*3P}/\partial \beta < 0$,两者

成反比.□

对4种回收模式而言,当提高质量水平的努力成本系数较小时,随着需求价格弹性系数的增大,产品市场需求降低,但因为提高质量水平所付出的成本较小,质量水平提高所增加的利润足以弥补提高其所付出的努力成本和需求降低所减少的利润,所以回收产品的质量水平提高.当提高质量水平的努力成本系数较高时,质量水平提高所付出的成本较大,加上需求降低,使得增加的利润不足以弥补付出的高额努力成本,因此回收产品的质量水平降低.

3 闭环供应链模型比较分析

根据模型求解,结果如表1所示.对模型C、模型M、模型R和模型3P的相关变量进行比较分析,可以得到如下命题.表1中

$$X = \frac{4\alpha k - c_m\tau^2\beta^2(b - a)^2}{2\beta[4k - \beta\tau^2(b - a)(c_s - a)]} - \frac{\beta[(b - a)(2c_s - a - b)\alpha\tau^2 - 4kc_m]}{2\beta[4k - \beta\tau^2(b - a)(c_s - a)]},$$

$$Y = \frac{k(\alpha - \beta c_m)^2}{4\beta[4k - \beta\tau^2(b - a)(c_s - a)]^2} \times \frac{[12k - \beta\tau^2(a - b)(3a - b - 2c_s)]}{4\beta[4k - \beta\tau^2(b - a)(c_s - a)]^2},$$

$$Z = \frac{k(\alpha - \beta c_m)^2}{4\beta[4k - \beta\tau^2(b - a)(c_s - b)]^2} \times \frac{[\beta\tau^2(b - a)(3b - a - 2c_s) + 12k]}{4\beta[4k - \beta\tau^2(b - a)(c_s - b)]^2}.$$

命题5 在这4种闭环供应链模型中:

1)若 $c_s > (3b - a)/2$ 或者 $c_s < (3b - a)/2$ 且 $k > (\beta\tau^2(c_s - a)^2(b - a))/(8(c_s - b))$,则回收产品最优质量水平的关系为

$$q^{*C} > q^{*R} > q^{*M} > q^{*3P};$$

2)若 $c_s < (3b - a)/2$ 且 $k < \frac{\beta\tau^2(c_s - a)^2(b - a)}{8(c_s - b)}$,则回收产品最优质量水平的关系为

$$q^{*C} > q^{*M} > q^{*R} > q^{*3P}.$$

证明 将各闭环供应链模型中的最优回收产品质量水平进行比较,因为 $k > \beta\tau^2(c_s - a)^2/4$,令 $\delta = \beta\tau^2(c_s - a)$, $\phi = \alpha - \beta c_m$,得到

$$q^{*C} - q^{*M} = \frac{4\tau k \phi (c_s - a)}{[4k - \delta(c_s - a)][8k - \delta(c_s - a)]} > 0,$$

$$q^{*C} - q^{*R} = \frac{\tau \phi [4k(2c_s - a - b)\delta(b - a)(c_s - a)]}{2[4k - \delta(c_s - a)][4k - \delta(b - a)]} > 0,$$

表1 闭环供应链4种回收模式最优定价和利润求解结果

模型C	模型M	模型R	模型3P
q^*	$\frac{\tau(\alpha - \beta c_m)(c_s - a)}{4k - \beta\tau^2(c_s - a)^2}$	$\frac{\tau(\alpha - \beta c_m)(c_s - a)}{8k - \beta\tau^2(c_s - a)^2}$	$\frac{\tau(\alpha - \beta c_m)(b - a)}{8k - 2\beta\tau^2(b - a)(c_s - b)}$
p^*	$\frac{2\alpha k - \beta[\alpha\tau^2(c_s - a)^2 - 2kc_m]}{\beta[4k - \beta\tau^2(c_s - a)^2]}$	$\frac{6\alpha k - \beta[\alpha\tau^2(c_s - a)^2 - 2kc_m]}{\beta[8k - \beta\tau^2(c_s - a)^2]}$	$\frac{3\alpha k - \beta[\alpha\tau^2(b - a)(c_s - a) - kc_m]}{\beta[4k - \beta\tau^2(b - a)(c_s - b)]}$
w^*	$\frac{4\alpha k - \beta[\alpha\tau^2(c_s - a)^2 - 4kc_m]}{\beta[8k - \beta\tau^2(c_s - a)^2]}$	X	$\frac{2\alpha k - \beta[\alpha\tau^2(b - a)(c_s - b) - 2kc_m]}{\beta[4k - \beta\tau^2(b - a)(c_s - b)]}$
D^*	$\frac{2k(\alpha - \beta c_m)}{4k - \beta\tau^2(c_s - a)^2}$	$\frac{k(\alpha - \beta c_m)}{4k - \beta\tau^2(b - a)(c_s - a)}$	$\frac{k(\alpha - \beta c_m)}{4k - \beta\tau^2(b - a)(c_s - b)}$
Π_M^*	$\frac{k(\alpha - \beta c_m)^2}{\beta[8k - \beta\tau^2(c_s - a)^2]}$	$\frac{k(\alpha - \beta c_m)^2}{2\beta[4k - \beta\tau^2(b - a)(c_s - a)]}$	$\frac{k(\alpha - \beta c_m)^2}{2\beta[4k - \beta\tau^2(b - a)(c_s - b)]}$
Π_R^*	$\frac{4k^2(\alpha - \beta c_m)^2}{\beta[8k - \beta\tau^2(c_s - a)^2]}$	$\frac{k(\alpha - \beta c_m)^2[4k - \beta\tau^2(b - a)^2]}{4\beta[4k - \beta\tau^2(b - a)(c_s - a)]^2}$	$\frac{k^2(\alpha - \beta c_m)^2}{\beta[4k - \beta\tau^2(b - a)(c_s - b)]^2}$
Π_{3P}^*			$\frac{k\tau^2(b - a)^2(\alpha - \beta c_m)^2}{4(4k - \beta\tau^2(b - a)(c_s - b))^2}$
Π^*	$\frac{k(\alpha - \beta c_m)^2}{\beta[4k - \beta\tau^2(c_s - a)^2]}$	$\frac{k[12k - \beta\tau^2(c_s - a)^2](\alpha - \beta c_m)^2}{\beta[8k - \beta\tau^2(c_s - a)^2]}$	Y Z

$q^{*C} - q^{*3P} = \frac{\tau\phi[4k(2c_s - a - b) - \delta(b - a)(a - 2b + c_s)]}{2[4k - \delta(c_s - a)][4k - \beta\tau^2(b - a)(c_s - b)]} > 0$,
 即 $q^{*C} > q^{*M}, q^{*C} > q^{*R}, q^{*C} > q^{*3P}, q^{*C}$ 最大. 又
 $q^{*M} - q^{*3P} = \frac{\tau\phi[8k(c_s - b) - \delta(b - a)(a - 2b + c_s)]}{2[8k - \delta(c_s - a)][4k - \beta\tau^2(b - a)(c_s - b)]} > 0$,
 $q^{*R} - q^{*3P} = \frac{\beta\tau^3\phi(b - a)^3}{2[4k - \delta(b - a)][4k - \beta\tau^2(b - a)(c_s - b)]} > 0$,
 即 $q^{*M} > q^{*3P}, q^{*R} > q^{*3P}$, 因此 q^{*3P} 最小. 又
 $q^{*M} - q^{*R} = \frac{\tau\phi[8k(c_s - b) - \delta(b - a)(c_s - a)]}{2[8k - \delta(c_s - a)](4k - \delta(b - a))}$,
 当 $c_s > (3b - a)/2$ 或者 $c_s < (3b - a)/2$ 且 $k > (\beta\tau^2(c_s - a)^2(b - a))/(8(c_s - b))$ 时
 $8k(c_s - b) - \beta\tau^2(b - a)(c_s - a)^2 < 0$,
 此时 $q^{*M} - q^{*R} < 0$, 即 $q^{*M} < q^{*R}$; 当 $c_s < (3b - a)/2$ 且 $k < \frac{\beta\tau^2(c_s - a)^2(b - a)}{8(c_s - b)}$ 时
 $8k(c_s - b) - \beta\tau^2(b - a)(c_s - a)^2 > 0$,
 此时 $q^{*M} - q^{*R} > 0$, 即 $q^{*M} > q^{*R}$. □

在4种闭环供应链模型中,集中情形下回收产品的质量水平是最高的,这是由于集中决策时避免了双重边际效应.此外,由比较分析得出,第三方回收时,回收产品的质量水平是最低的,这是因为第三方为提高质量水平需要付出高额的努力成本,但从制造商处获得的激励不足以弥补.

制造商回收和零售商回收时回收产品质量水平的高低状况比较复杂.当回收产品再制造所节约的单位成本较高时,零售商回收时回收产品的质量水平更高,这是因为在这种情况下,零售商回收更高质量的废旧产品,可以使得制造商节约更多的制造成本,从而使得产品的批发价降低,市场需求增加,这也就使得零售商正向链的利润增加.当回收产品再制造所节约的单位成本较低且努力成本系数较大时,零售商回收时回收产品的质量水平更高,在这种情况下,制造商回收高质量废旧产品所获得的收益不足以弥补其所付出的高额努力成本,此时零售商回收质量水平更高.当回收产品再制造所节约的单位成本较低但努力成本系数较小时,制造商付出的努力成本较少,回收更高质量的废旧产品可使其节约的制造成本相对较大,制造商利润增加,此时制造商回收质量水平更高.

命题6 在3种分散型闭环供应链模型中,正向链产品最优批发价格的关系为 $w^{*3P} > w^{*R} > w^{*M}$.

证明 前文已得出各模型中产品的最优批发价格,将其两两比较,因为 $k > \beta\tau^2(c_s - a)^2/4$, 令 $\delta = \beta\tau^2(c_s - a), \phi = \alpha - \beta c_m$, 得到

$$w^{*3P} - w^{*R} = \frac{\beta\phi\tau^4(c_s - b)(b - a)^3}{2[4k - \delta(b - a)][4k - \beta\tau^2(b - a)(c_s - b)]},$$

$$w^{*R} - w^{*M} = \frac{\tau^2\phi\{4k[(b - a)^2 + (c_s - b)^2] - \delta(c_s - a)(b - a)^2\}}{2[8k - \delta(c_s - a)][4k - \delta(b - a)]},$$

进而得到 $w^{*3P} > w^{*R}, w^{*R} > w^{*M}$, 即 $w^{*3P} > w^{*R}$

$> w^{*M}$. □

由命题5可知,第三方回收时回收产品的质量水平最低,这表明在此模式下,制造商所能节约的制造成本最少,因此,制造商为达到其最大利润,批发价格会更高.在制造商回收时,制造商只能降低批发价格以激励零售商购买更多的产品,但是在零售商回收时,批发价只是其中的一种激励因素.此外,回收更高质量的产品,零售商可以从制造商处获得转移价格激励,这便使得零售商回收时批发价格略高于制造商回收.

命题7 在4种闭环供应链模型中,正向链产品最优价格、最优需求的关系为:

1)若 $c_s < 2b - a$,则

$$p^{*C} < p^{*R} < p^{*M} < p^{*3P},$$

$$D^{*C} > D^{*R} > D^{*M} > D^{*3P};$$

2)若 $c_s = 2b - a$,则

$$p^{*C} < p^{*R} = p^{*M} < p^{*3P},$$

$$D^{*C} > D^{*R} = D^{*M} > D^{*3P};$$

3)若 $c_s > 2b - a$,则

$$p^{*C} < p^{*M} < p^{*R} < p^{*3P},$$

$$D^{*C} > D^{*M} > D^{*R} > D^{*3P}.$$

证明 前文已得出各模型中产品的最优价格和需求,因为价格与需求成反比,将各模型中产品最优需求的大小进行比较,即可得出产品最优价格的大小关系.因为 $k > \beta\tau^2(c_s - a)^2/4$,令 $\delta = \beta\tau^2(c_s - a)$, $\phi = \alpha - \beta c_m$,将各模型进行比较得到

$$D^{*C} - D^{*M} = \frac{8\phi k^2}{[8k - \delta(c_s - a)][4k - \delta(c_s - a)]} > 0,$$

$$D^{*C} - D^{*R} = \frac{k\phi[4k - \delta(2b - a - c_s)]}{[4k - \delta(c_s - a)][4k - \delta(b - a)]} > 0,$$

$$D^{*C} - D^{*3P} = \frac{k\phi\{4k + \beta\tau^2[(c_s - b)^2 + (b - a)^2]\}}{[4k - \delta(c_s - a)][4k - \beta\tau^2(b - a)(c_s - b)]} > 0,$$

即 $D^{*C} > D^{*M}$, $D^{*C} > D^{*R}$, $D^{*C} > D^{*3P}$,故 D^{*C} 最大.又

$$D^{*R} - D^{*3P} = \frac{k\phi\beta\tau^2(b - a)^2}{[4k - \delta(b - a)][4k - \beta\tau^2(b - a)(c_s - b)]} > 0,$$

$$D^{*M} - D^{*3P} =$$

$$\frac{k\phi\beta\tau^2[(c_s - b)^2 + (b - a)^2]}{[8k - \delta(c_s - a)][4k - \beta\tau^2(b - a)(c_s - b)]} > 0,$$

即 $D^{*R} > D^{*3P}$, $D^{*M} > D^{*3P}$,故 D^{*3P} 最小, p^{*3P} 最大.又

$$D^{*M} - D^{*R} = \frac{k\phi\delta(a - 2b + c_s)}{[8k - \delta(c_s - a)][4k - \delta(b - a)]},$$

当 $c_s < 2b - a$ 时, $D^{*M} - D^{*R} < 0$,即 $D^{*M} < D^{*R}$, $p^{*M} > p^{*R}$;当 $c_s = 2b - a$ 时,两者相等;当 $c_s > 2b - a$ 时, $D^{*M} > D^{*R}$, $p^{*M} < p^{*R}$. □

在集中情形下,制造商和零售商作为一个整体进行集中决策,产品价格最低、需求最大.此外,因为第三方回收时批发价格最高,由于双重边际效应的存在,此模式下产品的价格最高,产品需求最小.

制造商回收和零售商回收时产品价格的高低状况比较复杂,这是因为在零售商回收时,制造商的激励分为两方面:批发价格和转移价格.由比较分析得出一个阈值 $c_s = 2b - a$,在此情形下,两种模式下产品的零售价格 and 市场需求是一致的.当 c_s 小于该阈值时,零售商回收情形下零售价格较低,市场需求较高;当 c_s 大于该阈值时,制造商回收情形下零售价格较低,市场需求较高.

命题8 在分散型闭环供应链模型中,制造商最优利润的关系为:

1)当 $c_s < 2b - a$ 时

$$\Pi_M^{*R} > \Pi_M^{*M} > \Pi_M^{*3P};$$

2)当 $c_s = 2b - a$ 时

$$\Pi_M^{*R} = \Pi_M^{*M} > \Pi_M^{*3P};$$

3)当 $c_s > 2b - a$ 时

$$\Pi_M^{*M} > \Pi_M^{*R} > \Pi_M^{*3P}.$$

证明 前文已得出各模型中制造商的最优利润,因为 $k > \beta\tau^2(c_s - a)^2/4$,令 $\delta = \beta\tau^2(c_s - a)$, $\phi = \alpha - \beta c_m$,将各模型中制造商利润进行比较得到

$$\Pi_M^{*M} - \Pi_M^{*3P} = \frac{k\tau^2\phi^2[(b - a)^2 + (b - c_s)^2]}{2[8k - \delta(c_s - a)][4k - \beta\tau^2(b - a)(c_s - b)]} > 0,$$

$$\Pi_M^{*R} - \Pi_M^{*3P} = \frac{k\tau^2\phi^2(b - a)^2}{2[4k - \delta(b - a)][4k - \beta\tau^2(b - a)(c_s - b)]} > 0,$$

即 $\Pi_M^{*M} > \Pi_M^{*3P}$, $\Pi_M^{*R} > \Pi_M^{*3P}$,因此 Π_M^{*3P} 最小.又

$$\Pi_M^{*M} - \Pi_M^{*R} = \frac{k\tau^2\phi^2(c_s - a)(a - 2b + c_s)}{2[8k - \delta(c_s - a)][4k - \delta(b - a)]},$$

当 $c_s < 2b - a$ 时, $\Pi_M^{*M} - \Pi_M^{*R} < 0$,即 $\Pi_M^{*M} < \Pi_M^{*R}$;

当 $c_s = 2b - a$ 时, $\Pi_M^{*M} = \Pi_M^{*R}$; 当 $c_s > 2b - a$ 时, $\Pi_M^{*M} > \Pi_M^{*R}$. □

由前文可知在第三方回收时, 产品的市场需求最低, 制造商节约的制造成本最低, 因此制造商的利润在第三方回收时最低.

制造商回收和零售商回收时制造商利润高低的情况比较复杂, 受到再制造所能节约的单位成本大小的影响. 由比较分析得出一个阈值 $c_s = 2b - a$, 在此情形下, 两种模式下制造商的最优利润是一致的. 当 c_s 小于该阈值时, 零售商回收时的市场需求更大, 回收产品数量增加所节约的再制造成本更多, 制造商利润更大; 当 c_s 大于该阈值时, 零售商回收时的市场需求更小, 导致制造商所节约的再制造成本更少, 制造商利润更小.

由命题5和命题8可以得出如下结论: 当再制造节约的单位成本较低时, 零售商回收是最优选择; 当再制造节约的单位成本较高时, 制造商回收时制造商的利润最大, 但回收产品的质量水平低于零售商回收情形. 因此, 制造商需衡量其再制造成本, 从制造商回收和零售商回收中选择最优的回收渠道.

各渠道零售商利润和供应链总利润的大小关系无法进行数值上的比较, 通过算例观测其大小. 假设 $\alpha = 3, \beta = 0.1, \tau = 0.6, k = 1, a = 1, b = 3, c_m = 6$, 此时 $3 < c_s < 6$, 观察 c_s 的变化对各渠道零售商利润和供应链总利润大小关系的影响, 结果如图2和图3所示.

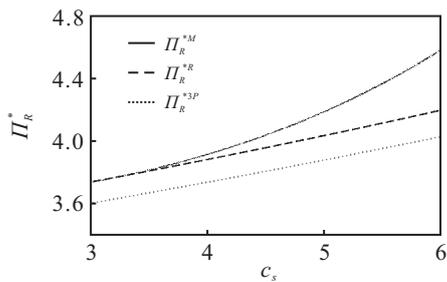


图2 各渠道零售商利润比较

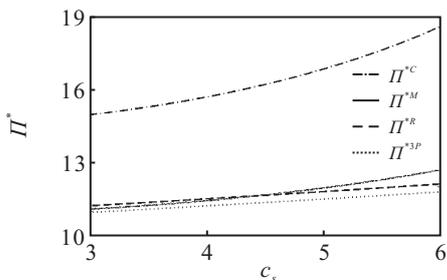


图3 各渠道供应链总利润比较

由图2和图3可见, 在4种闭环供应链模型中, 集中情形下的供应链总利润最大, 第三方回收时零售商利润最小. 在分散型闭环供应链模型中, 当 c_s 较小时,

零售商的利润在制造商回收和零售商回收时基本一致, 但供应链总利润在零售商回收时略大. 当 c_s 较大时, $\Pi_R^{*M} > \Pi_R^{*R} > \Pi_R^{*3P}$, $\Pi^{*M} > \Pi^{*R} > \Pi^{*3P}$.

在集中情形下, 因为不存在双重边际效应, 供应链总利润最大. 在分散情形下, 当第三方进行回收时, 产品的批发价最高, 市场需求最低, 使得零售商的利润在此情形下最低. 在分散情形下, 当回收产品再制造所能节约的单位成本较低时, 回收废旧产品带来的收益难以弥补回收的努力成本, 回收产品再制造节约的成本很低, 在这种情况下, 逆向供应链的作用小, 制造商回收和零售商回收时零售商的利润基本一致, 各渠道供应链总利润也相差不大. 当回收产品再制造所能节约的单位成本较高时, 由命题7可知, 制造商回收时市场需求更高, 回收产品的质量也更高, 这使得此情形下零售商的利润和供应链总利润均最大.

4 结 论

本文考虑通过回收努力来提高回收产品的质量水平, 研究了回收产品质量水平对闭环供应链制造商回收渠道选择的影响. 首先建立了集中回收模式和3种分散回收模式的模型, 考察了在不同回收模式下最优回收产品质量水平和供应链各成员利润的变化, 分析了回收率、再制造节约的单位成本、回收价格和转移价格等关键参数对回收产品质量水平等的影响, 并比较分析了不同回收模式下零售商、制造商和供应链利润的大小关系. 总结起来得到以下结论:

- 1) 回收率和再制造节约单位成本增加会使得回收产品的质量水平升高, 回收价格增加会使得回收产品的质量水平降低;
- 2) 需求价格影响因子的大小对回收产品质量水平的影响与努力成本系数的大小有关;
- 3) 制造商为使其利润最大化, 会将再制造所节约的成本部分或全部转移给回收方, 以激励回收方回收更高质量的产品;
- 4) 当再制造过程中节约的单位成本较低时, 制造商选择零售商回收, 此时制造商的利润最大, 回收产品的质量水平也最高; 当再制造节约的单位成本较高时, 制造商回收时制造商的利润最大, 但回收产品的质量水平低于零售商回收情形. 再制造所能节约的最大单位成本不同, 制造商对回收渠道的选择也会不同, 因此制造商需衡量其再制造成本, 从制造商回收和零售商回收中选择最优的回收渠道;
- 5) 在本文的假设情形下, 第三方回收均为下策.

可从以下方面进行后续研究:

- 1) 考虑回收努力对回收产品质量水平和回收率

的双重影响,研究制造商回收渠道的选择问题;

2) 建立一个契约机制,使得在某一回收模式下,既可使得回收产品的质量水平达到最高,又可使得制造商的利润最大;

3) 基于回收产品质量水平,考虑制造商竞争或零售商竞争对供应链回收模式的影响;

4) 考虑消费者对新产品和再制造产品的不同偏好,基于消费者的行为偏好研究回收产品质量水平对供应链渠道的影响。

参考文献(References)

- [1] Rahman S, Subramanian N. Factors for implementing end-of-life computer recycling operations in reverse supply chains[J]. *Int J of Production Economics*, 2012, 140(1): 239-248.
- [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] 孙嘉轶, 滕春贤, 陈兆波. 基于回收价格与销售数量的再制造闭环供应链渠道选择模型[J]. *系统工程理论与实践*, 2013, 33(12): 3079-3086.
(Sun J Y, Teng C X, Chen Z B. Channel selection model of remanufacturing closed-loop supply chain based on buy-back price and sale quantity[J]. *Systems Engineering—Theory & Practice*, 2013, 33(12): 3079-3086.)
- [5] Atasu A, Toktay L B, Wassenhove L N V. How collection cost structure drives a manufacturer's reverse channel choice[J]. *Production & Operations Management*, 2013, 22(5): 1089-1102.
- [6] 聂佳佳. 零售商信息分享对闭环供应链回收模式的影响[J]. *管理科学学报*, 2013, 16(5): 69-82.
(Nie J J. Effects of retailer information sharing on collecting modes of closed-loop supply chain[J]. *J of Management Science in China*, 2013, 16(5): 69-82.)
- [7] 付小勇, 朱庆华, 赵铁林. 基于逆向供应链间回收价格竞争的回收渠道选择策略[J]. *中国管理科学*, 2014, 22(10): 72-79.
(Fu X Y, Zhu Q H, Zhao T L. Selection of the recovery channel based on recovery price competition between the reverse supply chains[J]. *Chinese J of Management Science*, 2014, 22(10): 72-79.)
- [8] Hong X, Xu L, Du P, et al. Joint advertising, pricing and collection decisions in a closed-loop supply chain[J]. *Int J of Production Economics*, 2015, 167: 12-22.
- [9] Akerlof G A. The market for lemons: Quality uncertainty and the market mechanism[J]. *Quarterly J of Economics*, 1970, 84(3): 488-500.
- [10] Chen W, Kucukyazici B, Verter V. Supply chain design for unlocking the value of remanufacturing under uncertainty[J]. *European J of Operational Research*, 2015, 247(3): 804-819.
- [11] Atalay A, Souza G C. How does product recovery affect quality choice?[J]. *Production & Operations Management*, 2013, 22(4): 991-1010.
- [12] 高举红, 侯丽婷, 王海燕, 等. 考虑碳排放的闭环供应链收益波动规律分析[J]. *机械工程学报*, 2015, 51(2): 190-197.
(Gao J H, Hou L T, Wang H Y, et al. Regularity research on revenue fluctuation analysis of closed-loop supply chain considered carbon emissions[J]. *J of Mechanical Engineering*, 2015, 51(2): 190-197.)
- [13] Mukhopadhyay S K, Ma H. Joint procurement and production decisions in remanufacturing under quality and demand uncertainty[J]. *Int J of Production Economics*, 2009, 120(1): 5-17.
- [14] Das K, Chowdhury A H. Designing a reverse logistics network for optimal collection, recovery and quality-based product-mix planning[J]. *Int J of Production Economics*, 2012, 135(1): 209-221.
- [15] Corbett C J, Groote X D. A supplier's optimal quantity discount policy under asymmetric information[J]. *Management Science*, 2000, 46(3): 444-450.
- [16] Bulow J I. Durable-goods monopolist[J]. *J of Political Economy*, 1982, 90(2): 314-332.
- [17] Weng Z K. Channel coordination and quantity discounts[J]. *Management Science*, 1995, 41(9): 1509-1522.
- [18] Zhao H. Raising awareness and signaling quality to uninformed consumers: A price-advertising model[J]. *Marketing Science*, 2000, 19(4): 390-396.

(责任编辑: 郑晓蕾)