需求扰动下闭环供应链回收决策及协调策略

孙嘉轶[1,2], 滕春贤[1], 姚锋敏[1]
(1. 哈尔滨理工大学系统工程研究所, 黑龙江 哈尔滨 150080;
2. 哈尔滨工程大学经济管理学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要: 考虑废旧产品的回收再制造周期, 研究了两周期闭环供应链应对需求扰动的回收决策和协调问题. 建立了确定性需求下的闭环供应链第一及第二周期模型. 进而, 在需求扰动下根据不同的扰动程度, 得出了相应的定价及回收决策, 并设计了新的回收数量折扣契约和能力约束线性定价契约, 协调闭环供应链的利润. 结果表明, 当需求扰动造成的废旧产品自愿返还数量变化较小时, 保持原回收计划, 适当调整回收价格即可; 若扰动程度较大, 则原计划需相应调整. 通过与扰动后仍按原计划执行的情形进行比较, 发现协调策略可以减缓需求扰动给闭环供应链带来的影响.

关键词: 闭环供应链; 需求扰动; 两周期; 协调
中图分类号: F224 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000−5781(2017)05−0699−11
doi: 10.13383/j.cnki.jse.2017.05.012

Adjusted recycling decision and coordination strategy in closed-loop supply chain under demand disruption

Sun Jiayi[1,2], Teng Chunxian[1], Yao Fengmin[1]
(1. Institute of System Engineering, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080, China
2. School of Economics and Management, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

Abstract: This paper studies the recycling decision and coordination problems of a two-period closed-loop supply chain with demand disturbance for the recycling and remanufacturing period of waste products. The model of the closed-loop supply chain under determined demand in the first and second period are established respectively. Then, according to the degree of disturbance, the corresponding price decision and recycling strategy are obtained, and the new recycling quantity discount contract and capacity-constrained linear pricing policy are also designed to coordinate the profit of the closed-loop supply chain. The results show that when the disturbance of the voluntarily return quantities of waste products caused by demand disruption is small, the closed-loop supply chain should keep the original recycling program and adjust the recycling price appropriately; otherwise, when the disturbance is large, the original program should be adjusted accordingly. Compared with the situation where the supply chain remains the original program under demand disruption, the coordination strategy can mitigate the impact of the disturbance.

Key words: closed-loop supply chain; demand disruption; two-period; coordination

收稿日期: 2016−07−14; 修订日期: 2017−04−10.
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(71171069; 71301036); 中国博士后科学基金资助项目(2017M611360); 国家人文社科基金资助项目(17CGL007); 教育部人文社科基金资助项目(15YJC630119); 国家自然科学基金青年资助项目(71701056).

1 引 言

随着人们对资源环境问题的日益重视, 在循环经济方面体现出巨大优势的闭环供应链受到了社会的广泛关注. 很多制造企业通过回收再制造降低其生产成本及资源消耗, 同时提高了社会效益, 如 Kodak 等[1,2]. 供应链突发事件应急管理近年来引起了国内外学者的广泛关注, 其思想起源于应急管理, 最早应用于航空公司解决突发事件领域, 取得了良好的效果[3]. 供应链应急管理立足于解决"正向"过程中突发事件的协调问题, 并未考虑"逆向"过程中的应急管理, 及"正向"过程与"逆向"过程突发事件的交互影响. 基于此, 本文试图从闭环供应链应急管理的视角, 探讨需求扰动时两周期闭环供应链的应急管理问题.

Yu[3]认为在扰动事件发生以后, 供应链系统在确定情形下制定的最优计划, 不再是新环境下的最优计划, 供应链需制定新的计划以减少扰动事件对供应链带来的影响. 如何有效的应对干扰事件, 国内外学者通过大量的研究发现, 契约是协调供应链扰动的有效手段. Qi 等[4]在需求发生扰动后, 以总成本最小为优化目标, 发现数量折扣契约可以有效的协调具有单一制造商和单一零售商的供应链系统. 进一步, Xiao 等[5]研究了具有竞争零售商的供应链模型, 探讨促销协调需求扰动的效果, 结果表明促销补贴率契约可以协调该供应链系统. 在此基础上, Chen 等[6]在需求扰动下, 构建了包含一个制造商及多个竞争零售商, 且其中一个零售商具有主导地位的供应链模型, 分别验证了批发价契约和数量折扣契约协调的有效性. 徐兵等[7,8]分别以多商品流三层供应链网络为研究对象, 在需求发生扰动时, 分析了二次订货与回购契约以及二次订货与退货契约对该系统协调的效果. 此外, 一些学者针对供应链供应扰动, 成本扰动及多方面扰动等做出了相关的研究[9−11]. 然而以上研究都是针对"正向"供应链应对突发事件的协调策略, 并没有考虑突发事件对资源在"逆向"反馈过程中的影响及相应的协调策略.

近年来, 学者们针对闭环供应链的回收渠道选择[1,2,12]及定价决策[13−15]等问题进行了大量的研究, 关于闭环供应链应急管理的研究相对较少. Zhao 等[16,17]研究了突发事件对闭环供应链网络的影响及其应对策略. 牟宗玉等[18]针对制造商回收的差别定价闭环供应链, 在新产品及再制品均受突发事件影响发生干扰的情况下, 设计了可以协调闭环供应链的数量折扣契约. 吴海燕等[19]研究了具有两个竞争制造商的闭环供应链模型, 在制造商自身扰动, 竞争对手扰动和同时扰动三种情形下的最优生产决策. 李新然等[20]验证了收益共享契约协调一个由零售商负责回收的闭环供应链系统的有效性. 进一步, 韩小花等[21]以一个制造商和两个竞争零售商组成的闭环供应链系统为研究对象, 得到了其在需求扰动下的生产决策与协调机制. 还有一些学者针对闭环供应链多方面扰动问题的研究, 王玉燕[22]研究了闭环供应链应对市场需求和成本双扰动的生产策略和协调机制. 王旭等[23]以一个二级闭环供应链为研究对象, 当干扰事件引起市场规模, 再制造成本, 回收价格敏感系数同时发生扰动时, 探讨了数量折扣契约协调的有效性. 覃艳华[24]则在突发事件导致销售市场规模和废旧品回收市场初始规模同时发生变化时, 针对一个二级闭环供应链的收益共享契约协调的有效性进行了研究.

综上所述, 上述研究对丰富闭环供应链应急管理的研究做出了重要贡献, 但仍有一些不足之处. 例如: 1) 已有文献的研究都是以单周期闭环供应链为研究对象的, 即新产品与再制品的生产, 销售, 回收及再制造, 再销售都在同一周期内完成. 然而, 对一些使用寿命较短的商品来说, 其废旧产品的回收再制造往往很难与新产品在同一周期完成, 现有的文献并未涉及对于此类商品的应急管理问题的研究. 2) 已有文献在回收数量函数的刻画上, 大致分为两类, 一类是以 Savaskan[1,2]的研究为代表, 废旧产品的回收数量通过回收率来刻画, 回收率与产品的销售数量相关; 另一类研究中, 废旧产品的回收数量与废旧产品的回收价格相关[25]. 这两类对于回收数量函数的假设均有合理性, 但相对片面. 已有研究表明废旧产品的回收数量与产品的销售数量及废旧产品的回收价格均相关, 在这种体系下, 闭环供应链的回收决策及协调策略是否会发生改变值得关注. 3) 现有文献的扰动, 均是突发事件对系统当中的某一个或某几个要素产生扰动, 例如市场规模, 产品的生产成本, 价格敏感系数等, 而忽略了系统构成要素之间的相互联系, 当突发事件对某一要素产生干扰

时, 这种干扰可能会引起系统当中其它要素的变化, 由于闭环供应链的“环形结构”特点, 这种干扰的传递更加容易发生, 这一问题值得深入探讨. 鉴于此, 本文以两周期二级闭环供应链为研究对象, 文献[26]假设本文的回收数量函数, 探讨如下问题: 当突发事件使得第一周期的产品需求发生扰动时, 由于第二周期中废旧产品的回收数量与回收价格及第一周期的产品需求相关, 第一周期中产品的需求扰动会影响第二周期中产品的回收数量及回收的利润, 调整闭环供应链相应的回收决策, 并制定相适应的协调策略, 以减缓需求扰动对其的冲击和影响.

2　确定性需求的闭环供应链模型

在确定性需求下, 两周期闭环供应链由一个制造商和一个零售商组成, 制造商负责产品的生产以及再制造, 零售商负责产品的销售以及回收. 在 Stackelberg 博弈框架下, 第一周期中, 闭环供应链仅有新材料生产新品; 第二周期中, 制造商同时生产新品和再制品, 消费者对于新品和再制品的接受度相同, 本文假设该模型中信息是完全对称的, 同时, 回收的废旧产品达到再制造质量要求, 全部转化为再制品.

2.1　第一周期模型

假设制造商的新品单位生产成本为 c_{m}, 制造商将产品出售给零售商的单位价格为 w, 零售商出售产品的单位价格是 $\tilde{p}$. 市场中的实际需求是 $\tilde{q}$, D 是潜在市场份额, k 是销售过程中的价格敏感系数. 需求函数为 $\tilde{q}=D-k\tilde{p}$, 其供应链的利润为

$$\tilde{\mathit{\Pi}}=(\tilde{p}-c_{\mathrm{m}})(D-k\tilde{p}).$$

可见第一周期模型并未涉及回收再制造过程, 是一个开环结构的供应链模型, 现有文献对此类问题的研究较多, 故本文仅给出结论, 此时供应链的最优策略为

$$\begin{aligned}&\tilde{p}^*=(D+kc_{\mathrm{m}})/(2k),\\&\tilde{q}^*=D-k\tilde{p}^*=(D-kc_{\mathrm{m}})/2,\\&\tilde{\mathit{\Pi}}^*=(D-kc_{\mathrm{m}})^2/(4k).\end{aligned}$$

2.2　第二周期模型

第二周期中, 零售商回收第一周期的废旧产品, 制造商进行新品和再制品的生产, 再制品的单位生产成本为 c_{r}, 令 $\delta=c_{\mathrm{m}}-c_{\mathrm{r}}$, 则有 $c_{\mathrm{m}}>\delta$. 零售商以单位回收价格 b 从市场中回收废旧产品, 制造商以单位回收价格 m 从零售商处回收废旧产品. 废旧产品的回收由两部分组成, 一部分, 随着消费者环保意识的增强, 市场中有一部分消费者愿意无偿返还废旧产品, 无偿返还废旧产品的数量与第一周期中产品的销售数量 $\tilde{q}^*$ 相关, θ 表示自愿返还废旧产品数量所占的比率; 另一部分, 废旧产品的回收数量与市场中的回收价格 b 相关, κ 为回收价格敏感系数. 则第二周期废旧产品的回收数量函数为 $g=\theta\tilde{q}^*+\kappa b$[26]. 令 $\xi=\theta\tilde{q}^*=\theta(D-kc_{\mathrm{m}})/2$, ξ 是非负且确定的, 表示第二周期中自愿返回废旧产品的数量, 则第二周期中产品回收数量函数可以简化为 $g=\xi+\kappa b$.

第二周期闭环供应链的利润由正向供应链利润及逆向供应链利润两部分组成, 其决策变量为 p 和 b, 则第二周期闭环供应链的利润函数为

$$\mathit{\Pi}_{\mathrm{sc}}=(p-c_{\mathrm{m}})(D-kp)+(\delta-b)(\xi+\kappa b).$$

本文所关注的问题是, 第一周期的需求扰动造成第二周期中自愿返还废旧产品数量的变化, 研究第二周期中回收决策的变化及制定相应的协调策略. 故对第二周期中正向供应链的决策内容不予赘述, 仅考虑回收过程中的决策.

由于利润函数 $\mathit{\Pi}_{\mathrm{sc}}$ 是 p 和 b 的联合凹函数, 可得零售商最优回收价格为

$$\bar{b}=(\kappa\delta-\xi)/(2\kappa).$$

命题 1 当 $\xi \leqslant \kappa\delta$ 时, $\bar{b} \geqslant 0$.

命题 1 表明当市场中自愿返还废旧产品的数量 ξ 不超过阈值的时候, 零售商才有动力回收市场中的废旧产品; 反之, 零售商没有动力回收废旧产品.

进一步求得最优回收数量及回收产生的利润分别为

$$\bar{g} = \xi + \kappa\bar{b} = (\xi + \kappa\delta)/2,$$
$$\bar{\varPi}_{\rm sc}^{\rm r} = (\xi + \kappa\delta)^2/(4\kappa).$$

得到最大回收利润以后, 有以下两个问题需要解决: 一是如何激励零售商以 $\bar{b}$ 的价格回收 $\bar{g}$ 数量的废旧产品; 二是制造商和零售商如何分配最大回收利润. 根据文献[4]本文采用全单位回收数量折扣契约(all-unit recycling quantity discount policy) $T(m_1, m_2, g_0)(m_1 < m_2)$来实现利润的协调, 内容如下: 当零售商的回收数量小于 g_0 时, 则制造商以 m_1 的单位回收价格从零售商处回收废旧产品; 当零售商的回收数量大于 g_0 时, 则制造商以 m_2 的单位回收价格从零售商处回收废旧产品.

令制造商的期望回收利润为 $\bar{\varPi}_{\rm m}^{\rm r} = \rho\bar{\varPi}_{\rm sc}^{\rm r}, 0 < \rho < 1$. ρ 表示制造商期望回收利润占闭环供应链最优回收利润的比值. 制造商可以通过制定恰当的全单位回收数量折扣契约, 使得零售商以 $\bar{b}$ 的单位回收价格回收 $\bar{g}$ 数量的废旧产品, 从而达到制造商的期望利润 $\bar{\varPi}_{\rm m}^{\rm r}$, 以及闭环供应链的最优回收利润 $\bar{\varPi}_{\rm sc}^{\rm r}$.

定理 1 若制造商期望回收利润为 $\bar{\varPi}_{\rm m}^{\rm r} = \rho\bar{\varPi}_{\rm sc}^{\rm r}, 0 < \rho < 1$, 则闭环供应链可在策略 $T(\bar{m}_1, \bar{m}_2, \bar{g})$, $(\bar{m}_1 < \bar{m}_2)$ 下达到协调, 其中 $\bar{m}_1 < -\xi/\kappa + \sqrt{1-\rho}((\xi + \kappa\delta)/\kappa), \bar{m}_2 = \delta - \rho(\xi + \kappa\delta)/(2\kappa)$.

定理 1(定理 1 的证明见附录) 表明, 策略 $T(m_1, m_2, g_0)$ 实施的关键在于三个参数的选取, g_0 取闭环供应链系统最优的回收数量 $\bar{g}$ 即可. 接下来, 在给定制造商期望利润 $\bar{\varPi}_{\rm m}^{\rm r}$ 的条件下, 由于利润函数的凹性, m_2 的选取应使得当零售商的回收数量小于 $\bar{g}$ 时, 零售商会回收 $\bar{g}$ 数量的废旧产品以实现利润最大化, 同时, 当零售商回收 $\bar{g}$ 数量的废旧产品时, 制造商的回收利润为其期望利润 $\bar{\varPi}_{\rm m}^{\rm r}$. 而 m_1 的选取应使得零售商在此回收价格下, 获得小于闭环供应链最优回收利润与制造商期望回收利润的差的利润, 且 $m_1 < m_2$ 即可. 即对于给定的 m_2, 总能找到一个充分小的 m_1 满足上述条件. 故下文中无需给出 m_1 的上界.

3 需求扰动下闭环供应链的回收决策

本节讨论需求扰动下两周期闭环供应链的回收决策问题, 假定闭环供应链中有一个集成化的决策者, 他的目标是使得整个闭环供应链的回收利润最大. 第一周期中市场需求的扰动, 造成了第二周期中自愿返还废旧产品数量的变化. 假设第二周期中自愿返还废旧产品数量的变化量为 $\Delta\xi$, 若 $\Delta\xi > 0$, 表示市场中自愿返回废旧产品数量的增加量; 若 $\Delta\xi < 0$, 则表示市场中自愿返回废旧产品数量的减少量. 此时, 零售商在需求扰动下实际废旧产品的回收数量函数为 $g = \xi + \Delta\xi + \kappa b$, 且满足 $\xi + \Delta\xi > 0$. 进而, 零售商的回收价格为 $b = (g - \xi - \Delta\xi)/\kappa$. 由于自愿返还废旧产品回收数量的变化造成第二周期中废旧产品回收数量偏离原计划, 令 $\Delta g = g - \bar{g}$ 表示回收数量的偏离量, 若 $\Delta g < 0$, 需以很低的价格将剩余的废旧产品库存卖到二级市场; 若 $\Delta g > 0$, 则需高价购入废旧产品. 因此, 无论废旧产品的回收数量是增加还是减少, 都会引起确定性需求下原最优回收计划的改变, 同时产生额外的费用. 在进行新的回收及定价决策时, 此部分费用应作为新目标函数中的一部分.

需求扰动下, 第二周期闭环供应链的回收利润函数为

$$\varPi_{\rm sc}^{\rm r} = g\left(\delta - \left(g - \xi - \Delta\xi\right)/\kappa\right) - \chi_1(g - \bar{g})^+ - \chi_2(\bar{g} - g)^+, \tag{1}$$

其中 $\chi_1, \chi_2 > 0$ 表示边际额外成本, χ_1 是超出原回收计划的单位额外回收成本, χ_2 是少于原回收计划的单位处理成本, $(x)^+ = \max\{0, x\}$.

下面的引理从直观上表述了第一周期需求的扰动对第二周期的回收决策的影响.

引理 1 假设式(1)中 $\varPi_{\rm sc}^{\rm r}$ 的最大值在 g^* 处取得, 则

1) 当 $\Delta\xi > 0$ 时, $g^* > \bar{g}$; 2) 当 $\Delta\xi = 0$ 时, $g^* = \bar{g}$; 3) 当 $\Delta\xi < 0$ 时, $g^* < \bar{g}$.

引理 1(引理 1 的证明见附录) 表明, 当市场中自愿返还废旧产品的数量增加时, 废旧产品的最优回收数量增加; 当市场中自愿返还废旧产品的数量减少时, 最优回收数量相应减少; 当市场中自愿返还废旧产品数量不变时, 最优回收数量也不变.

3.1 需求增大情形下的回收决策

下面考虑需求扰动量为正时闭环供应链的回收决策. 由引理 1, 可知当 $\Delta\xi > 0$ 时, 式(1)可化简为

$$\mathit{\Pi}_{\rm sc}^{\rm r1}(g) = g(\delta - (g - \xi - \Delta\xi)/\kappa) - \chi_1(g - \bar{g}).$$

约束条件为 $g > \bar{g}$, 由一阶条件$(\mathit{\Pi}_{\rm sc}^{\rm r1}(g))' = 0$, 可得

$$g_1 = (\xi + \Delta\xi + \kappa(\delta - \chi_1))/2. \tag{2}$$

在约束条件 $g > \bar{g}$ 下分析式(2) , 分为以下两种情形:

情形 1 当 $\Delta\xi \geqslant \chi_1\kappa$ 时, g_1 满足约束条件 $g \geqslant \bar{g}$, 则 $g^*_{\rm case1} = g_1$.

情形 2 当 $0 < \Delta\xi < \chi_1\kappa$ 时, 则 $g < \bar{g}$, 则 $g^*_{\rm case2} = \bar{g}$.

$$g^* = \begin{cases} g^*_{\rm case1} = (\xi + \Delta\xi + \kappa(\delta - \chi_1))/2, & \text{情形 } 1 \\ g^*_{\rm case2} = (\xi + \kappa\delta)/2, & \text{情形 } 2. \end{cases}$$

情形 1 中, 零售商最优回收价格及闭环供应链最优回收利润分别为

$$b^*_{\rm case1} = \bar{b} - (\Delta\xi + \chi_1\kappa)/(2\kappa),\ \mathit{\Pi}^{\rm r1*}_{\rm sc,case1} = \left((\xi + \kappa\delta)^2 + 2\Delta\xi(\xi + \kappa\delta) + (\Delta\xi - \chi_1\kappa)^2\right)/(4\kappa).$$

情形 2 中, 零售商最优回收价格及闭环供应链最优回收利润分别为

$$b^*_{\rm case2} = \bar{b} - \Delta\xi/\kappa,\ \mathit{\Pi}^{\rm r1*}_{\rm sc,case2} = ((\xi + \kappa\delta)^2 + 2\Delta\xi(\xi + \kappa\delta))/(4\kappa).$$

以上分析表明, 除非自愿返还废旧产品数量增加的幅度很大, 否则确定性需求下的最优回收计划不需要改变, 然而只要市场中自愿返回废旧产品的数量是增加的, 零售商的最优回收价格总是会降低的. 注意到, 在情形 1 和情形 2 中最优回收价格有可能降为零, 原因是市场中自愿返还废旧产品的数量足够大, 零售商没有动力去回收废旧产品, 即在情形 1 中 $\Delta\xi > 2\kappa\bar{b} - \chi_1\kappa$; 在情形 2 中 $\Delta\xi > \kappa\bar{b}$. 但此时闭环供应链的回收利润总是正的, 即废旧产品自愿返还数量的增加对闭环供应链的回收利润总是有益的.

3.2 需求减小情形下的回收决策

下面考虑需求扰动量为负时闭环供应链的回收决策. 同理, 由引理 1, 当 $\Delta\xi < 0$ 时, 式(1)可化简为

$$\mathit{\Pi}_{\rm sc}^{\rm r2}(g) = g(\delta - (g - \xi - \Delta\xi)/\kappa) - \chi_2(\bar{g} - g).$$

约束条件为 $g < \bar{g}$. 由一阶条件 $(\mathit{\Pi}_{\rm sc}^{\rm r2}(g))' = 0$, 可得

$$g_2 = (\xi + \Delta\xi + (\delta + \chi_2)\kappa)/2.$$

类似地, 也有两种情形需要考虑.

情形 3 当 $-\chi_2\kappa \leqslant \Delta\xi < 0$ 时, 则 $g^*_{\rm case3} = \bar{g}$.

情形 4 当 $\Delta\xi < -\chi_2\kappa$ 时, 则 $g^*_{\rm case4} = g_2$.

$$g^* = \begin{cases} g^*_{\rm case3} = (\xi + \kappa\delta)/2, & \text{情形 } 3 \\ g^*_{\rm case4} = (\xi + \kappa\delta)/2 + (\Delta\xi + \chi_2\kappa)/2, & \text{情形 } 4. \end{cases}$$

情形 3 中, 零售商最优回收价格及闭环供应链最优回收利润分别为

$$b^*_{\rm case3} = \bar{b} - \Delta\xi/\kappa,\ \mathit{\Pi}^{\rm r1*}_{\rm sc,case3} = ((\xi + \kappa\delta)^2 + 2\Delta\xi(\xi + \kappa\delta))/(4\kappa).$$

情形 4 中, 零售商最优回收价格及闭环供应链最优回收利润分别为

$$b^*_{\rm case4} = \bar{b} - (\Delta\xi - \chi_2\kappa)/(2\kappa),\ \mathit{\Pi}^{\rm r1*}_{\rm sc,case4} = ((\xi + \kappa\delta)^2 + 2\Delta\xi(\xi + \kappa\delta) + (\Delta\xi + \chi_2\kappa)^2)/(4\kappa).$$

定理 2 当第一周期需求扰动造成的第二周期自愿返还废旧产品数量的扰动量为 $\Delta\xi$ 时, 使得闭环供应链回收利润最大的废旧产品回收数量为

$$g^* = \begin{cases} \bar{g} + (\Delta\xi + \chi_2\kappa)/2, & \Delta\xi < -\chi_2\kappa \\ \bar{g}, & -\chi_2\kappa \leqslant \Delta\xi \leqslant \chi_1\kappa \\ \bar{g} + (\Delta\xi - \chi_1\kappa)/2, & \chi_1\kappa < \Delta\xi. \end{cases}$$

零售商的最优回收价格为

$$b^* = \begin{cases} \bar{b} - (\Delta\xi - \chi_2\kappa)/(2\kappa), & \Delta\xi < -\chi_2\kappa \\ \bar{b} - (\Delta\xi)/\kappa, & -\chi_2\kappa \leqslant \Delta\xi \leqslant \chi_1\kappa \\ \bar{b} - (\Delta\xi + \chi_1\kappa)/(2\kappa), & \chi_1\kappa < \Delta\xi. \end{cases}$$

此时，闭环供应链的最优回收利润为

$$\Pi_{\rm sc}^{\rm r*} = \begin{cases} ((\xi + \kappa\delta)^2 + 2\Delta\xi(\xi + \kappa\delta) + (\Delta\xi + \chi_2\kappa)^2)/(4\kappa), & \Delta\xi < -\chi_2\kappa \\ ((\xi + \kappa\delta)^2 + 2\Delta\xi(\xi + \kappa\delta))/(4\kappa), & -\chi_2\kappa \leqslant \Delta\xi \leqslant \chi_1\kappa \\ ((\xi + \kappa\delta)^2 + 2\Delta\xi(\xi + \kappa\delta) + (\Delta\xi - \chi_1\kappa)^2)/(4\kappa), & \chi_1\kappa < \Delta\xi. \end{cases}$$

定理 2 表明在第一周期需求发生扰动时, 闭环供应链在第二周期回收过程中应如何对应需求的扰动. 当第一周期需求增加或者减小的幅度较小时, 保持确定性需求下的最优回收计划即可, 只需适当的调整零售商的回收价格即可实现最优; 当需求增加或者减小的幅度较大时, 回收计划及回收价格都需相应调整.

3.3 比较分析

若需求扰动发生后, 决策者采取无作为策略, 仍执行确定性需求的最优计划, 即维持原最优回收数量 $\bar{g}$ 和回收价格 $\bar{b}$, 则当 $\xi + \Delta\xi + \kappa\bar{b} > 0$ 时, 实际回收量为 $\hat{g} = \xi + \Delta\xi + \kappa\bar{b}$, 则闭环供应链的回收利润 $\hat{\Pi}_{\rm sc}^{\rm r}$ 可以写成

$$\hat{\Pi}_{\rm sc}^{\rm r}(\hat{g}) = \hat{g}(\delta - \hat{g}) - \chi_1(\Delta\xi)^+ - \chi_2(\Delta\xi)^-,$$

其中 $(x)^- = \max\{0, -x\}$.

当 $\xi + \Delta\xi + \kappa\bar{b} \leqslant 0$ 时, 则闭环供应链的回收利润为 $-\chi_2\bar{g}$. 可得

$$\hat{\Pi}_{\rm sc}^{\rm r} = \begin{cases} ((\xi + \kappa\delta)^2 + 2\Delta\xi(\xi + \kappa\delta))/(4\kappa) - \chi_1\Delta\xi, & \Delta\xi > 0 \\ ((\xi + \kappa\delta)^2 + 2\Delta\xi(\xi + \kappa\delta))\,/(4\kappa) + \chi_2\Delta\xi, & \Delta\xi < 0, \xi + \Delta\xi - \kappa\bar{b} > 0 \\ -\chi_2(\xi + \kappa\delta)/2, & \xi + \Delta\xi - \kappa\bar{b} \leqslant 0. \end{cases}$$

自愿返还废旧产品数量发生扰动时, 根据不同的扰动程度, 闭环供应链在调整策略和无作为策略下获得的回收利润差为

$$\Pi_{\rm sc,casei}^{\rm r} - \hat{\Pi}_{\rm sc}^{\rm r} = \begin{cases} (\Delta\xi - \chi_1\kappa)^2/(4\kappa) + \chi_1\Delta\xi, & \chi_1\kappa < \Delta\xi \\ \chi_1\Delta\xi, & 0 < \Delta\xi \leqslant \chi_1\kappa \\ -\chi_2\Delta\xi, & -\chi_2\kappa \leqslant \Delta\xi < 0, \xi + \Delta\xi + \kappa\bar{b} > 0 \\ ((\xi + \kappa\delta)^2 + 2(\Delta\xi + \chi_2\kappa)(\xi + \kappa\delta))\,/(4\kappa), & -\chi_2\kappa \leqslant \Delta\xi < 0, \xi + \Delta\xi + \kappa\bar{b} \leqslant 0 \\ (\Delta\xi - \chi_1\kappa)^2/(4\kappa) - \chi_2\Delta\xi, & \Delta\xi < -\chi_2\kappa, \xi + \Delta\xi + \kappa\bar{b} > 0 \\ (\xi + \Delta\xi - (\delta - \chi_2)\kappa)^2/(4\kappa), & \Delta\xi < -\chi_2\kappa, \xi + \Delta\xi + \kappa\bar{b} \leqslant 0. \end{cases}$$

结果表明当 $\Delta\xi \neq 0$ 时, 调整回收决策的闭环供应链获得的回收利润比扰动后仍执行原计划的闭环供应链回收利润大, 并且当 $\Delta\xi$ 的变化范围较小时, 闭环供应链获得的回收利润差与 $\Delta\xi$ 的变化成线性关系, 随着 $\Delta\xi$ 的增大, 闭环供应链获得的回收利润差与 $\Delta\xi$ 的二次方相关.

4 需求扰动下闭环供应链的协调策略

本节讨论需求扰动下闭环供应链的新协调策略. 分为需求增大和需求减小两种情形分析.

4.1 需求增大情形下的协调策略

情形 1 $\Delta\xi \geqslant \chi_1\kappa$

此时闭环供应链的回收利润经过简单的数学变换, 可以写成 $\Pi^{\mathrm{r}}_{\mathrm{sc,case1}} = \dfrac{(\xi+\Delta\xi+(\delta-\chi_1)\kappa)^2}{4\kappa} + \chi_1\bar{g}$.

根据制造商的期望利润 $\Pi^{\mathrm{r}}_{\mathrm{m,case1}}$ 的不同区间, $\Pi^{\mathrm{r}}_{\mathrm{m,case1}} \geqslant \chi_1\bar{g}$ 和 $\Pi^{\mathrm{r}}_{\mathrm{m,case1}} < \chi_1\bar{g}$, 又可分为以下两种情形处理.

1) $\Pi^{\mathrm{r}}_{\mathrm{m,case1}} \geqslant \chi_1\bar{g}$

此时 $\Pi^{\mathrm{r}}_{\mathrm{m,case1}} = \rho\dfrac{(\xi+\Delta\xi+(\kappa-\chi_1)\kappa)^2}{4\kappa} + \chi_1\bar{g}$, 其中 $0 \leqslant \rho < 1$.

定理 3 当 $\Delta\xi \geqslant \chi_1\kappa$ 且 $\Pi^{\mathrm{r}}_{\mathrm{m,case1}} \geqslant \chi_1\bar{g}, 0 \leqslant \rho < 1$ 时, 闭环供应链可以通过全单位回收数量折扣契约 $T(m_1, m_2, g^*_{\mathrm{case1}})$ 达到协调, 其中 m_1 充分小, $m_2 = \delta - \chi_1 - \rho\dfrac{\xi+\Delta\xi+(\delta-\chi_1)\kappa}{2\kappa}$.

定理 1 的证明过程给出了需求扰动下设计全单位回收数量折扣契约的一般思想, 对于定理 3 及下面的其他情形同样适用, 故省略其证明.

2) $\Pi^{\mathrm{r}}_{\mathrm{m,case1}} < \chi_1\bar{g}$

此时 $\Pi^{\mathrm{r}}_{\mathrm{m,case1}} = \rho\chi_1\bar{g}$, 对于这种情形, 引入能力约束线性定价契约 $F(m, C)$, 其原理为制造商设定其废旧产品单位回收价格 m, 及零售商废旧产品回收数量下限 C.

定理 4 当 $\Delta\xi \geqslant \chi_1\kappa$ 且 $\Pi^{\mathrm{r}}_{\mathrm{m,case1}} = \rho\chi_1\bar{g}, 0 \leqslant \rho < 1$ 时, 闭环供应链可以通过策略 $F(m, q^*_{\mathrm{case1}})$ 达到协调, 其中 $m = \delta - \chi_1 - (\rho-1)\dfrac{\chi_1(\xi+\kappa\delta)}{\xi+\Delta\xi+(\delta-\chi_1)\kappa}$.

情形 2 $0 < \Delta\xi \leqslant \chi_1\kappa$

此情形下制造商的期望利润为

$$\Pi^{\mathrm{r}}_{\mathrm{m,case2}} = \rho\Pi^{\mathrm{r}}_{\mathrm{sc,case2}} = \rho\left(\frac{(\xi+\kappa\delta)^2}{4\kappa} + \Delta\xi\frac{(\xi+\kappa\delta)}{2\kappa}\right).$$

定理 5 当 $0 < \Delta\xi \leqslant \chi_1\kappa$ 时,

1) 当 $\rho > \dfrac{2\Delta\xi}{\xi+2\Delta\xi\kappa\delta}$ 时, $T(m_1, m_2, \bar{g})$ 可以协调闭环供应链;

2) 当 $\rho \leqslant \dfrac{2\Delta\xi}{\xi+2\Delta\xi\kappa\delta}$ 时, $F(m_2, \bar{g})$ 可以协调闭环供应链, 其中 m_1 充分小, $m_2 = \delta - \rho\dfrac{\xi+2\Delta\xi+\kappa\delta}{2\kappa}$.

4.2 需求减小情形下的协调策略

情形 3 $-\chi_2\kappa \leqslant \Delta\xi < 0$

1) $\xi + \kappa\delta + 2\Delta\xi > 0$

此情形下闭环供应链的回收利润为正, 假设此时制造商的期望回收利润为

$$\Pi^{\mathrm{r}}_{\mathrm{m,case3}} = \rho\Pi^{\mathrm{r}}_{\mathrm{sc,case3}} = \rho\left(\frac{(\xi+\kappa\delta)^2}{4\kappa} + \Delta\xi\frac{(\xi+\kappa\delta)}{2\kappa}\right).$$

定理 6 当 $-\chi_2\kappa \leqslant \Delta\xi < 0$ 且 $\xi + \kappa\delta + 2\Delta\xi > 0$ 时,

1) 当 $\rho > \dfrac{2\Delta\xi}{\xi+2\Delta\xi\kappa\delta}$ 时, $T(m_1, m_2, \bar{g})$ 可以协调闭环供应链;

2) 当 $\rho \leqslant \dfrac{2\Delta\xi}{\xi+2\Delta\xi\kappa\delta}$ 时, $F(m_2, \bar{g})$ 可以协调闭环供应链, 其中 m_1 充分小, $m_2 = \delta - \rho\dfrac{\xi+2\Delta\xi+\kappa\delta}{2\kappa}$;

3) $\xi + \kappa\delta + 2\Delta\xi < 0$.

在此情形下, 经过计算发现 $b^*_{\text{case3}} - m_2 > 0$, 即零售商的单位回收利润为负, 零售商不会回收废旧产品, 然而制造商仍需按原计划额外回收 $\bar{g}$ 数量的废旧产品, 此时制造商获得的回收利润为 $-\chi_2\bar{g}$. 制造商为减少损失需要采取一些措施激励零售商回收, 因此, 从零售商角度制定回收价格是合理的, 此时零售商的期望回收利润为

$$\Pi^{\text{r}}_{\text{r,case3}} = -\rho\Pi^{\text{r}}_{\text{sc,case3}} = -\rho\Big(\frac{(\xi+\kappa\delta)^2}{4\kappa} + \Delta\xi\frac{(\xi+\kappa\delta)}{2\kappa}\Big),$$

则制造商此时的回收利润为

$$\Pi^{\text{r}}_{\text{m,case3}} = \Pi^{\text{r}}_{\text{sc,case3}} - \Pi^{\text{r}}_{\text{r,case3}} = (1+\rho)\Big(\frac{(\xi+\kappa\delta)^2}{4\kappa} + \Delta\xi\frac{(\xi+\kappa\delta)}{2\kappa}\Big).$$

当 $\Pi^{\text{r}}_{\text{m,case3}} > -\chi_2\bar{g}$ 时, 制造商才会考虑此协调方案; 否则, 制造商宁愿额外回收废旧产品. 此条件与 $\rho < -\dfrac{\xi+\kappa\delta+2(\Delta\xi+\chi_2\kappa)}{\xi+2\Delta\xi+\kappa\delta}$ 等价.

定理 7 当 $-\chi_2\kappa \leqslant \Delta\xi < 0$ 且 $\xi+\kappa\delta+2\Delta\xi < 0$ 时,

1) 当 $0 < \rho \leqslant -\dfrac{\xi+\kappa\delta}{\xi+2\Delta\xi+\kappa\delta}$ 时, $T(m_1, m_2, \bar{g})$ 可以协调闭环供应链;

2) 当 $-\dfrac{\xi+\kappa\delta}{\xi+2\Delta\xi+\kappa\delta} < \rho < -\dfrac{\xi+\kappa\delta+2(\Delta\xi+\chi_2\kappa)}{\xi+2\Delta\xi+\kappa\delta}$ 时, $F(m_2, \bar{g})$ 可以协调闭环供应链;

3) 当 $\rho \geqslant -\dfrac{\xi+\kappa\delta+2(\Delta\xi+\chi_2\kappa)}{\xi+2\Delta\xi+\kappa\delta}$ 时, 制造商宁愿自己回收 $\bar{g}$ 数量的废旧产品, 其中 m_1 充分小, $m_2 = \dfrac{\xi+2\Delta\xi-\kappa\delta}{2\kappa} - \rho\dfrac{\xi+2\Delta\xi+\kappa\delta}{2\kappa}$.

情形 4 $\Delta\xi < -\chi_2\kappa$

此时闭环供应链的回收利润经过变换, 可以写成

$$\Pi^{\text{r}}_{\text{sc,case4}} = \frac{(\xi+\Delta\xi+(\delta+\chi_2)\kappa)^2}{4\kappa} - \chi_2\bar{g}.$$

同样, 从零售商角度考虑, 零售商的期望回收利润为

$$\Pi^{\text{r}}_{\text{r,case4}} = \frac{(\xi+\Delta\xi+(\delta+\chi_2)\kappa)^2}{4\kappa} - \rho\chi_2\bar{g}.$$

制造商此时的回收利润为 $\Pi^{\text{r}}_{\text{m,case4}} = (\rho-1)\chi_2\bar{g}$ 是负的, 同样需满足 $\Pi^{\text{r}}_{\text{m,case4}} > -\chi_2\bar{g}$, 即 $\rho > 0$, 于是有以下定理.

定理 8 当 $\Delta\xi < -\chi_2\kappa$ 且 $\rho_2 > 0$ 时, $T(m_1, m_2, q^*_{\text{case4}})$ 可以协调闭环供应链, 其中 m_1 充分小, $m_2 = \delta - \chi_2 - \dfrac{\rho\chi_2(\xi+\kappa\delta)}{\xi+\Delta\xi+(\delta+\chi_2)\kappa}$.

4.3 比较分析

若制造商在需求扰动时仍采取确定性需求下的策略 $T(\bar{m}_1, \bar{m}_2, \bar{g})$, 其中 $\bar{m}_1 < -\dfrac{\xi}{\kappa} + \sqrt{1-\rho}\left(\dfrac{\xi+\kappa\delta}{\kappa}\right)$, $\bar{m}_2 = \delta - \rho\dfrac{\xi+\kappa\delta}{2\kappa}$. 此时零售商的回收利润为 $\Pi^{\text{r}}_{\text{r}} = g\left(\bar{m}_2 - \dfrac{g-\xi-\Delta\xi}{\kappa}\right)$, $\Pi^{\text{r}}_{\text{r}}$ 在 $\bar{g}_1 = \bar{g} + \dfrac{\Delta\xi-\rho\bar{g}}{2}$ 处取得最大值. 当 $\Delta\xi > \rho\bar{g}$ 时, 零售商会订购 $\bar{g}_1$ 数量的产品以实现自身回收利润最大化. 而对制造商而言, 若 $\bar{m}_2 > \delta - \chi_1$, 则回收零售商超出部分 $\dfrac{\Delta\xi-\rho\bar{g}}{2}$ 的废旧产品使得其每单位减少 $\delta - \chi_1 - \bar{m}_2$ 的利润. 由于制造商提供的回收价格 $\bar{m}_2$ 是确定的常数, 所以多回收废旧产品对于零售商来说显然总是有利的.

在 $\Delta\xi > \rho\bar{g}$ 条件下, 接下来考虑闭环供应链的协调问题, 在情形 1 条件下, $g^*_{\text{case1}} \geqslant \bar{g}$, 在情形 2 条件下, $g^*_{\text{case2}} = \bar{g}$. 如前文所述, 当 $\Delta\xi > \rho\bar{g}$ 时, $\bar{g}_1 > \bar{g}$. 因此, 只有当 $\bar{g}_1 = g^*_{\text{case1}}$, 或者说当 $\chi_1\kappa = \rho\bar{g}$ 时, 闭环供应链才能协调.

当 $\Delta\xi < \rho\bar{g}$ 时, m_1 充分小, 零售商有两个选择, 若他能获得回收利润, 则回收 $\bar{g}$ 数量的废旧产品; 反之, 则不回收废旧产品. 而零售商能否获得利润取决于其回收价格 $\hat{b} = \dfrac{\bar{g}-\xi-\Delta\xi}{\kappa}$ 是否小于制造商提供的回

收价格 $\bar{m}_2$. 若 $\hat{b} < \bar{m}_2$ 等价于 $\Delta\xi > (\rho-1)\bar{g}$, 零售商回收 $\bar{g}$ 数量的废旧产品, 则制造商获得的利润等于其期望利润. 当 $\Delta\xi > 0$ 时, 有 $\hat{b} < \bar{b}$, 零售商将能获得比原计划更多的回收利润. 反之, 零售商获得比原计划少的回收利润. 对闭环供应链而言, 当 $-\chi_2\kappa \leqslant \Delta\xi \leqslant \chi_1\kappa$, 闭环供应链能够达到协调, 此时对应于情形 2 和情形 3, 废旧产品的回收量为 $\bar{g}$.

表 1 给出了需求扰动后制造商无作为的闭环供应链的一些结果.

表 1　制造商扰动后无作为闭环供应链结果

Table 1　Results of closed-loop supply chain when the supplier is unaware of the demand disruption

	制造商		零售商	逆向供应链
$\Delta\xi$	达到目标?	更多利润?	更多利润?	协调条件
$\Delta\xi > \rho\bar{g}$	$\bar{m}_2 \leqslant \delta - \chi_1$	$\bar{m}_2 \leqslant \delta - \chi_1$	总是	$\chi_1\kappa = \rho\bar{g}$
$(\rho-1)\bar{g} < \Delta\xi \leqslant \rho\bar{g}$	总是	从不	$\Delta\xi > 0$	$-\chi_2\kappa \leqslant \Delta\xi \leqslant \chi_1\kappa$
$\Delta\xi \leqslant (\rho-1)\bar{g}$	从不	从不	从不	从不

表 1 表明通过协调策略应对需求扰动的必要性. 通过制定新的协调策略制造商可以达到甚至超过未发生扰动时的期望回收利润, 同时也使得制造商和零售商的利润分配机制更具柔性. 若制造商对需求扰动采取无作为策略, 对制造商而言, 即使自愿返还废旧产品的数量是增加的, 其都有可能达不到期望回收利润, 甚至造成下游零售商拒绝回收废旧产品, 从而造成更大的损失; 而对零售商而言, 只要市场当中自愿返还废旧产品的数量是增加的, 其总会获得比未发生扰动时期望回收利润更高的利润, 而协调也带给零售商更大的回收利润. 因此, 对于整个闭环供应链系统而言, 协调策略总是更加有利的.

5　结束语

本文构建了具有一个制造商和一个零售商的两周期闭环供应链模型, 研究了需求扰动对闭环供应链系统回收决策及协调策略的影响. 主要研究成果如下: 当需求扰动造成的自愿返还废旧产品数量变化程度较小时, 保持原回收决策即可实现最优, 此时仅需要适当调整废旧产品的回收价格即可; 反之, 即使调整计划需要额外的费用, 原回收决策仍需相应调整. 当需求发生扰动时, 若闭环供应链仍执行原回收决策, 对制造商和零售商来说都有可能降低各自的回收利润, 尤其对制造商来说是更不利的; 而闭环供应链及时调整回收决策总是会获得更大的回收利润, 同时回收数量折扣契约及能力约束线性定价契约能够协调闭环供应链的利润.

参考文献:

[1] Savaskan R C, Bhattacharya S, Wassenhove L V. Closed-loop supply chain models with product remanufacturing. Management Science, 2004, 50(2): 239–253.

[2] Savaskan R C, Wassenhove L V. Reverse channel design: The case of competing retailers. Management Science, 2006, 52(5): 1–14.

[3] Yu G, Argüello M, Song G, et al. A new era for crew recovery at continental airline. Interfaces, 2003, 33(1): 5–22.

[4] Qi X T, Bard J F, Yu G. Supply chain coordination with demand disruptions. The International Journal of Management Science, 2004, 32(4): 301–312.

[5] Xiao T J, Yu G, Sheng Z H, et al. Coordination of a supply chain with one-manufacturer and two-retailers under demand promotion and disruption management decisions. Annals of Operations Research, 2005, 135(1): 87–109.

[6] Chen K B, Xiao T J. Demand disruption and coordination of the supply chain with a dominant retailer. European Journal of Operational Research, 2009, 197(1): 225–234.

[7] 徐　兵, 张小平. 基于二次订货与回购的供应链网络应对需求扰动. 系统工程学报, 2012, 27(5): 668–678.
Xu B, Zhang X P. Supply chain network coping with demand disruption based on second order and buy-back contracts. Journal of Systems Engineering, 2012, 27(5): 668–678. (in Chinese)

[8] 徐　兵, 蒋　昆. 多商品流供应链网络应对随机需求扰动研究. 运筹与管理, 2014, 23(6): 144–151.
Xu B, Jiang K. Study on the multi-commodity supply chain network coping with random demand disruption. Operations Research and Management Science, 2014, 23(6): 144–151. (in Chinese)

[9] Yang Z B, Aydn G, Babich V, et al. Supply disruption, asymmetric information, and a backup production option. Management Science, 2009, 55(2): 192–209.

[10] 何 波, 张 霞, 王 娟. 制造成本扰动下链与链竞争的定价和生产决策. 计算机集成制造系统, 2015, 21(12): 3310–3318.
He B, Zhang X, Wang J. Pricing and production decisions in chain-to-chain competition under production costs disruption. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2015, 21(12): 3310–3318. (in Chinese)

[11] 徐 浩, 李佳川. 成本和需求扰动时双渠道供应链的协调机制研究. 预测, 2014, 33(4): 70–75.
Xu H, Li J C. Research on coordination mechanisms of dual-channel supply chains when cost and demand are disrupted. Forecasting, 2014, 33(4): 70–75. (in Chinese)

[12] 李晓静, 艾兴政, 唐小我. 基于链与链竞争的再制造产品销售渠道的研究. 系统工程学报, 2016, 31(5): 666–675.
Li X J, Ai X Z, Tang X W. Marketing channel structure of remanufactured products under competing supply chain. Journal of Systems Engineering, 2016, 31(5): 666–675. (in Chinese)

[13] Wang W B, Zhang Y, Zhang K, et al. Reward-penalty mechanism for closed-loop supply chains under responsibility sharing and different power structures. International Journal of Production Economics, 2015, 170: 178–190.(online)

[14] 王婷婷, 南国芳. 基于博弈论的零售商产品回收决策模型. 系统工程学报, 2015, 30(6): 790–803.
Wang T T, Nan G F. Decision making model based on game theory for retailer recycling mode. Journal of Systems Engineering, 2015, 30(6): 790–803. (in Chinese)

[15] 程永宏, 熊中楷. 碳标签制度下产品碳足迹与定价决策及协调. 系统工程学报, 2016, 31(3): 386–397.
Cheng Y H, Xiong Z K. Product carbon footprint and pricing decisions and coordination under carbon labelling system. Journal of Systems Engineering, 2016, 31(3): 386–397. (in Chinese)

[16] Zhao L D, Qu L B, Liu M. Disruption coordination of closed-loop supply chain network (I): Models and theorems. International Journal of Innovative Computing Information and Control, 2008, 4(11): 1349–1498.

[17] Zhao L D, Liu M, Qu L B. Disruption coordination of closed-loop supply chain network (II): Analysis and simulations. International Journal of Innovative Computing Information and Control, 2009, 5(2): 511–520.

[18] 牟宗玉, 刘晓冰, 李新然, 等. 生产成本扰动下差别定价闭环供应链的应对策略及协调. 计算机集成制造系统, 2015, 21(1): 256–265.
Mu Z Y, Liu X B, Li X R, et al. Dealing strategies and coordination of closed-loop supply chain with differential price under production cost disruption .Computer Integrated Manufacturing Systems, 2015, 21(1): 256–265.(in Chinese)

[19] 吴海燕, 韩小花. 再制造成本扰动情景下制造商竞争型闭环供应链的生产决策. 计算机集成制造系统, 2016, 22(4): 1129–1138.
Wu H Y, Han X H. Production decisions in manufacturer competing closed-loop supply chains under remanufacturing costs disruptions scenarios. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2016, 22(4): 1129–1138.(in Chinese)

[20] 李新然, 牟宗玉. 需求扰动下闭环供应链的收益费用共享契约研究. 中国管理科学, 2013, 21(6): 88–96.
Li X R, Mu Z Y. The study of closed-loop supply chain coordination under demand disruption with revenue and expense sharing contract. Chinese Journal of Management Science, 2013, 21(6): 88–96. (in Chinese)

[21] 韩小花, 吴海燕, 王 蓓. 需求扰动下竞争型闭环供应链的生产与协调决策分析. 运筹与管理, 2015, 24(3): 68–78.
Han X H, Wu H Y, Wang B. Production and coordination decisions in competing closed-loop supply chains with demand disruption. Operations Research and Management Science, 2015, 24(3): 68–78. (in Chinese)

[22] 王玉燕. 需求与成本双扰动时闭环供应链的生产策略和协调策略. 系统工程理论与实践, 2013, 33(5): 1149–1157.
Wang Y Y. Adjusted production strategy and coordination strategy in closed-loop supply chain when demand and cost disruptions. Systems Engineering: Theory & Practice, 2013, 33(5): 1149–1157. (in Chinese)

[23] 王 旭, 王银河. 需求和回收扰动的闭环供应链定价和协调. 计算机集成制造系统, 2013, 19(3): 624–630.
Wang X,Wang Y H. Coordination and pricing for closed-loop supply chain based on demand and collection disruptions. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2013, 19(3): 624–630. (in Chinese)

[24] 覃艳华. 销售市场和回收市场同时扰动下的闭环供应链协调应对. 运筹与管理, 2015, 24(5): 52–56.
Qin Y H. Closed-loop supply chain coordination under selling market and recycling market disruptions. Operations Research and Management Science, 2015, 24(5): 52–56. (in Chinese)

[25] 顾巧论, 高铁杠, 石连栓. 基于博弈论的逆向供应链定价策略分析. 系统工程理论与实践, 2005, 25(3): 20–25.
Gu Q L, Gao T G, Shi L S. Price decision analysis for reverse supply chain based on game theory. Systems Engineering: Theory & Practice, 2005, 25(3): 20–25. (in Chinese)

[26] 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. 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. Systems Engineering: Theory & Practice, 2013, 33(12): 3079–3086. (in Chinese)

作者简介:

孙嘉轶(1984—), 女, 黑龙江七台河人, 博士, 讲师, 研究方向: 闭环供应链管理, 决策优化等, Email: sjy_sjx@163.com;

滕春贤(1947—), 男, 山东莱州人, 硕士, 教授, 研究方向: 系统分析与优化, 评价理论与方法等, Email: tengcx@hrbust.edu.cn;

姚锋敏(1981—), 男, 陕西西安人, 博士, 副教授, 研究方向: 物流与供应链管理等, Email: fengmin_yao@hrbust.edu.cn.

附 录

定理 1 的证明 若零售商想要制造商以 $\bar{m}_2$ 的单位回收价格回收其废旧产品, 则其回收数量 g 应满足 $g \geqslant \bar{g}$. 此时零售商的回收利润函数可以表示成 $\bar{\Pi}_{\mathrm{r}}^{\mathrm{r}1} = g\left(\bar{m}_2 - \dfrac{g-\xi}{\kappa}\right)$, $\mathrm{g} \geqslant \bar{g}$.

由于 $\bar{\Pi}_{\mathrm{r}}^{\mathrm{r}1}$ 是凹函数, 且其可行域为 $g \geqslant \bar{g}$, 易知 $\bar{\Pi}_{\mathrm{r}}^{\mathrm{r}1}$ 在 $g_1 = \dfrac{\xi+\kappa\bar{m}_2}{2} < \bar{g}$ 处取不到最大值. 若零售商若想要获得 $\bar{m}_2$ 的回收价格, 只能回收 $\bar{g}$ 数量的废旧产品, 此时零售商的回收利润为

$$\bar{\Pi}_{\mathrm{r}}^{\mathrm{r}1} = \bar{g}\left(\bar{m}_2 - \frac{\bar{g}-\xi}{\kappa}\right) = \bar{g}\left(\delta - \rho\frac{\xi+\kappa\delta}{2\kappa} - \frac{\bar{g}-\xi}{\kappa}\right) = \bar{\Pi}_{\mathrm{sc}}^{\mathrm{r}} - \rho\frac{(\xi+\kappa\delta)^2}{4\kappa} = (1-\rho)\bar{\Pi}_{\mathrm{sc}}^{\mathrm{r}}.$$

若零售商的回收数量小于 $\bar{g}$, 则其获得的回收价格为 $\bar{m}_1$, 此时零售商的回收利润函数为

$$\bar{\Pi}_{\mathrm{r}}^{\mathrm{r}2} = g\left(\bar{m}_1 - \frac{g-\xi}{\kappa}\right), g < \bar{g}.$$

易知 $\bar{\Pi}_{\mathrm{r}}^{\mathrm{r}2}$ 在 $g_2 = \dfrac{\xi+\kappa\bar{m}_1}{2}$ 处取得最大值点, 由于 $\bar{m}_1 < -\dfrac{\xi}{\kappa} + \sqrt{1-\rho}\left(\dfrac{\xi+\kappa\delta}{\kappa}\right)$, 则 $g_2 < \bar{g}$ 且 $(\xi+\kappa\bar{m}_1)^2 < (1-\rho)(\xi+\kappa\delta)^2$, 即 $\bar{\Pi}_{\mathrm{r}}^{\mathrm{r}2} = \dfrac{(\xi+\kappa\bar{m}_1)^2}{4\kappa} < (1-\rho)\dfrac{(\xi+\kappa\delta)^2}{4\kappa} = \bar{\Pi}_{\mathrm{r}}^{\mathrm{r}1}$.

可见零售商以 $\bar{m}_2$ 的回收价格回收 $\bar{g}$ 数量的废旧产品将获得更大的回收利润, 同时可以实现闭环供应链的最大回收利润和制造商的期望回收利润, 即闭环供应链的利润得到了协调.

进一步说明策略 $T(\bar{m}_1, \bar{m}_2, \bar{g})$ 是数量折扣契约, 即说明 $\bar{m}_1 < \bar{m}_2$. 仅需要说明 $\bar{m}_1$ 的上界小于 $\bar{m}_2$ 即可. $-\dfrac{\xi}{\kappa} + \sqrt{1-\rho}\left(\dfrac{\xi+\kappa\delta}{\kappa}\right) < \delta - \rho\dfrac{\xi+\kappa\delta}{2\kappa}$. 等价于 $\dfrac{\xi+\kappa\delta}{\kappa} - \rho\dfrac{\xi+\kappa\delta}{2\kappa} > \sqrt{1-\rho}\left(\dfrac{\xi+\kappa\delta}{\kappa}\right)$. 经过化简, 上式等价于 $1-\dfrac{\rho}{2} > \sqrt{1-\rho}$, 也即 $0<\rho<1$, 故 $\bar{m}_1 < \bar{m}_2$. 证毕.

引理 1 的证明 由 2.2 节内容知, 当 $\Delta\xi = 0$ 时, $\bar{g}$ 使得 $\Pi_{\mathrm{sc}}^{\mathrm{r}}(g)$ 最大, 也即 $\forall g>0$ 有 $\dfrac{(\xi+\kappa\delta)^2}{4\kappa} \geqslant g\left(\delta - \dfrac{g-\xi}{\kappa}\right)$.

假设 $\Delta\xi > 0$ 但 $g^* \leqslant \bar{g}$. 于是 $\Pi_{\mathrm{sc}}^{\mathrm{r}}(g^*) = g^*\left(\delta - \dfrac{g^*-\xi}{\kappa}\right) + g^*\dfrac{\Delta\xi}{\kappa} - \chi_2(\bar{g}-g^*) \leqslant \dfrac{(\xi+\kappa\delta)^2}{4\kappa} + \bar{g}\dfrac{\Delta\xi}{\kappa} - \chi_2(\bar{g}-g^*) < \Pi_{\mathrm{sc}}^{\mathrm{r}}(\bar{g})$.

这与 g^* 最大化式(1)相矛盾, 因此, 当 $\Delta\xi > 0$ 时, 一定有 $g^* > \bar{g}$. 同理可证当 $\Delta\xi < 0$ 时, 一定有 $g^* < \bar{g}$. 当 $\Delta\xi = 0$ 时, 相当于未发生扰动, 此时 $g^* = \bar{g}$. 证毕.