

控制与决策

Control and Decision

信息非对称下考虑制造商回收行为的闭环供应链协调

王道平, 梁思涵, 王婷婷

引用本文:

王道平, 梁思涵, 王婷婷. 信息非对称下考虑制造商回收行为的闭环供应链协调[J]. *控制与决策*, 2021, 36(7): 1723–1731.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1657>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[考虑企业社会责任和公平偏好的绿色供应链决策](#)

Green supply chain considering fairness preference and corporate social responsibility

控制与决策. 2021, 36(7): 1743–1753 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1102>

[不同担保模式下考虑零售商公平关切的闭环供应链博弈模型](#)

Game models of closed-loop supply chain under different warranty modes considering retailer's fairness concerns

控制与决策. 2021, 36(6): 1489–1498 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1328>

[考虑成员企业风险态度的制造商资金约束闭环供应链定价与回收决策](#)

Pricing and recycling decisions of a closed-loop supply chain considering participators' risk attitudes and manufacturer capital constraint

控制与决策. 2021, 36(5): 1239–1248 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1305>

[模糊环境下考虑零售商风险偏好的绿色供应链博弈模型](#)

Modeling green supply chain games considering retailer's risk preference in fuzzy environment

控制与决策. 2021, 36(3): 711–723 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0646>

[损失厌恶下考虑参照利润效应的供应链决策模型](#)

Decision model of supply chain considering reference profit under loss aversion

控制与决策. 2020, 35(11): 2810–2816 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0094>

信息非对称下考虑制造商回收行为的闭环供应链协调

王道平[†], 梁思涵, 王婷婷

(北京科技大学 经济管理学院, 北京 100083)

摘要: 研究信息非对称下考虑制造商回收行为的闭环供应链协调问题, 其中回收率随时间动态变化, 制造商的再制品成本为私有信息. 通过构建分散决策模型, 得到制造商与零售商的最优均衡解, 并引入批发价格契约以促使制造商传递真实的成本信息. 运用伊藤过程刻画回收率的随机演化过程, 通过数值仿真分析信息隐匿度和回收率等参数对供应链的影响. 研究表明: 回收率在较短时间内能够达到稳定值, 并受不确定因素影响在稳定值上下波动. 外部激励比外部约束措施更能提升回收率. 信息隐匿会降低制造商的回收率和公开利润以及零售商利润, 批发价格契约的引入可有效提高供应链成员利润, 减小分散决策和信息非对称带来的损失, 使供应链实现帕累托改进.

关键词: 信息非对称; 动态回收率; 制造商回收; 批发价格契约; 闭环供应链; 伊藤过程

中图分类号: F270

文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2019.1657

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



引用格式: 王道平, 梁思涵, 王婷婷. 信息非对称下考虑制造商回收行为的闭环供应链协调[J]. 控制与决策, 2021, 36(7): 1723-1731.

Coordination of closed supply chain under asymmetric information considering manufacturer's recycling behavior

WANG Dao-ping[†], LIANG Si-han, WANG Ting-ting

(School of Economics and Management, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: The paper studies the closed supply chain coordination considering the manufacturer's recycling behavior under asymmetric information. The recovery rate changes dynamically with time and the manufacturer's remanufactured cost information is private. By constructing a decentralized decision model, the optimal equilibrium solution is obtained and the wholesale price contract is introduced to prompt the manufacturer to transmit the real cost information. The stochastic evolution process of recovery rate is described by using Ito process. The influence of parameters such as information hiding degree and recovery rate on the supply chain are analyzed by numerical simulation. Studies show that the recovery rate reaches a stable value in a short period of time, which fluctuates around the stable value because of the uncertainty fluctuates. External incentives improve recovery rates more than external constraints. Information concealment will reduce manufacturer's recycling rate and public profit and retailer's profit. The wholesale price contract can effectively improve the profit of supply chain members, reduce the loss caused by decentralized decision-making and information asymmetry, and achieve a Pareto improvement.

Keywords: asymmetric information; dynamic recovery rate; manufacturer recycling; wholesale price contract; closed supply chain; Ito process

0 引言

随着资源短缺和环境污染日益加剧, 企业对环境保护越来越重视, 闭环供应链应运而生. 闭环供应链是指企业从采购、制造、运输、最终销售到对产品的回收再制造环节所形成的循环, 包括了正向供应链和逆向供应链. 回收再制造融入了资源节约和环保的

理念, 使得资源利用率最高, 对环境的副作用最小. 因此, 不少企业将回收再制造纳入了自己的发展战略, 保护环境节约资源的同时提升了自己的竞争力.

企业的回收率不仅与自身回收努力相关, 还受到了政府激励、回收市场竞争等外界因素的影响. 随着影响回收率的因素逐渐增多, 回收率的不稳定性逐

收稿日期: 2019-11-26; 修回日期: 2020-02-21.

基金项目: 国家自然科学基金项目(71871017); 北京市教委社科基金项目(SM201910037004).

责任编委: 李登峰.

[†]通讯作者. E-mail: dpwang@ustb.edu.cn.

渐增大,这种不稳定性主要表现在回收率随时间的推移而动态变化.例如政府对回收行为不定期、不同力度的激励政策在一定程度上会促进企业的回收,提高企业的回收率,企业同时又会受到市场竞争、回收产品质量的随机性影响,从而加剧了回收率的不稳定性.当今正处于信息时代,信息量日益剧增,许多企业都正努力从中挖掘有效信息,拥有较多的有效信息有利于企业进行决策和规划.

激烈的市场竞争表面上是价格的竞争,实质上却是成本的竞争,良好的成本管理不仅能提高企业的生产能力和资源利用率,还能提高市场竞争能力,利于企业的可持续发展.然而,有些制造商故意高报部分成本信息以提高行业壁垒、获取补贴等,不仅造成了信息非对称的局面,扰乱了市场秩序,不利于市场公平竞争,还损害了供应链整体利润.对此,本文研究信息非对称下考虑制造商回收行为的供应链协调,对于回收再造企业进行成本管理和决策、维护市场公平以及闭环供应链管理协调具有重要的现实意义.

1 文献综述

企业的回收行为是闭环供应链中的重要一环,已成为许多国内外学者研究的重点,不少学者通过研究证实了进行废旧产品的回收,无论从产品、企业收益角度还是环境保护、资源节约角度,都优于不进行回收.Modak等^[1]对有回收行为的制造商和双寡头零售商之间的动态博弈进行了研究,发现回收时供应链的利润高于不回收;Raz等^[2]研究了制造商在竞争市场中是否进行回收的策略选择,证实了回收策略可为企业带来竞争优势.近年来,不少学者又对回收渠道进行了深入研究,有学者分析了回收率和回收产品的质量水平对定价的影响,发现第3方回收不利于回收率和产品质量的提升^[3].但制造商与第3方同时进行回收可提高制造商的回收效率和利润^[4-5].Arshad等^[6]通过比较不同的回收渠道,得出制造商直接回收优于委托第3方回收的结论;Li等^[7]从回收率等角度对回收渠道进行了研究,发现无论是集中决策还是分散决策,制造商进行回收均能实现制造商和零售商利润的双赢;Hong等^[8]构建了制造商领导的3种不同回收渠道模型,当回收成本相同时制造商回收的效率最高;Li等^[9]研究了供应不确定下制造商的回收策略,当供应不确定性较大时制造商倾向于自身回收策略.

从上述文献可知,在一定条件下制造商自身进行回收优于其他的回收渠道.制造商和零售商在分散决策下为了使各自的利润最大化,会出现定价高于其边际成本的现象,即双重边际效应.通过制定契

约进行有效协调可减轻以及避免双重边际效应带来的消极影响.许多学者对制造商进行回收时的供应链协调进行了研究.Huang等^[10]考虑了制造商进行回收时的随机干扰因素,通过建立契约对分散式决策进行有效协调,提高了各自以及供应链整体的利润;Wu等^[11]在两个零售商竞争的环境下利用收益共享契约对闭环供应链进行了协调.收益共享契约还可以减轻再制造成本中断风险带来的消极影响^[12].Zhao等^[13]针对生产规模不经济和需求扰动下的闭环供应链提出了收益费用共享契约,实现了帕累托改进;Zheng等^[14]考虑了零售商分担和共同分担两种成本分担契约,并利用两部收费制契约和收益共享契约改进了契约,优化了协调结果.还有学者研究了环境性能和再制造能力对闭环供应链的影响,并设计了不同的讨价还价契约以进行协调,提高了供应链的整体利润^[15].

然而,一些企业在进行回收再造、经营活动时选择隐匿部分经营信息,导致了市场信息的不对称,对供应链影响较大.不少学者在闭环供应链中考虑了信息非对称因素并建立了契约以进行有效协调.Hong等^[16]对由制造商和第3方回收商组成的闭环供应链进行研究,其中制造商回收信息为私有,通过建立契约进行有效协调,减小了信息非对称带来的消极影响;Zheng等^[17]通过建立两部定价契约,揭示了回收商的私有回收率和私有回收努力成本信息;Wang等^[18]考虑了回收商隐匿回收能力和努力水平的双重信息非对称,其中回收能力分低能力和高能力两种离散类型,提出了协调契约以激励回收商透露真实回收能力并提高回收努力水平.有学者在其基础上研究了回收能力为连续时的激励模型,针对不同回收能力的回收商设计了差异化的激励契约^[19-20].Zhang等^[21]对制造商回收成本信息不对称下零售商的激励问题进行了研究,发现制造商和零售商的利润随回收率的减小而降低,当制造商的回收率较高时,契约可进行有效激励和信息揭露.

上述文献对闭环供应链中企业的回收策略以及协调契约进行了深入研究,不少学者证实了回收行为可以提高企业的核心竞争力及利润,且多数情况下制造商直接回收优于零售商和第3方回收,同时还有学者考虑了信息非对称因素对回收策略的影响.但多数学者将回收率作为固定值,而实际上回收率受到多种因素的影响,存在一定程度的不稳定性,这种不稳定性主要表现在随时间动态变化,对企业回收决策的制定和闭环供应链都有着较大的影响.本文将随时

间变化的动态回收率与信息非对称相结合,研究分散决策下制造商再造成本私有时的闭环供应链均衡,并建立协调契约以减小信息非对称带来的损失.

2 模型建立与求解

2.1 问题描述和模型建立

本文研究由制造商和零售商组成的闭环供应链,其中制造商生产新产品的同时进行废旧产品的回收再制造,再造品与新品同质,外观包装无明显差异. 制造商隐匿再制造品的成本信息,其余信息均为对称信息. 制造商将再造品与原产品同价批发给零售商,零售商根据市场需求定价及销售. 假设供需关系平衡,即产量等于需求量. 制造商与零售商间进行 Stackelberg 主从博弈,制造商为博弈领导者,零售商为追随者,二者均为风险中性的理性决策者.

假设产品的市场需求为 Q , 受到零售价格 p 的影响,且与零售价格呈反向关系. 其中 $\beta (\beta > 0)$ 表示需求对价格的敏感系数, m 为产品的市场容量, $Q = m - \beta p (m > \beta p)$.

符号说明如下:

c_m 为制造商生产新品的单位生产成本;

c_r 为制造商生产再造品的单位生产成本 ($c_m > c_r$);

Q 为产品的市场需求;

m 为产品的市场容量;

$\varphi(t)$ 为制造商回收努力投入,为制造商的决策变量;

$w(t)$ 为制造商批发给零售商的单位批发价格,为制造商的决策变量;

$p(t)$ 为零售商的单位产品零售价格,为零售商的决策变量;

$\theta(t)$ 为制造商回收废旧资源的回收率;

β 为需求对零售价格的敏感系数 ($\beta > 0$);

λ 为制造商对再造品单位生产成本信息的隐匿度 ($\lambda > 0$);

μ 为废旧品回收率受到的外部激励系数;

n 为废旧品回收率受到的外部约束系数;

k 为制造商回收努力系数;

$dz(t)$ 为标准维纳过程;

$\sigma(\theta(t))$ 为回收率的波动率;

r 为市场利率.

废旧品的回收率不仅受回收商自身回收努力的影响,还受到许多外部因素和不可控因素的影响. 外部因素包括外部激励因素和外部约束因素,外部激励因素有政府的补贴、政策激励等,在一定程度上可提

高废旧产品回收率. 外部约束因素有市场竞争、回收渠道的不稳定等,在一定程度上降低了废旧产品的回收率. 回收率还受到回收设施的维护和消费者的环保意识等不可控因素的影响. 回收率的这种不稳定性可利用伊藤过程进行刻画. 伊藤过程在维纳过程即布朗运动的基础上增加了随机干扰项,通过随机微分方程来描述随机变量的随机特性,能够很好地刻画随机变量的时序特征. 借鉴文献 [22] 中运用伊藤过程对回收率的描述,本文中废旧产品回收率的演化可描述为以下伊藤过程:

$$d\theta(t) = (\varphi(t) + (\mu - n)\theta(t))dt + \sigma\sqrt{\theta(t)}dz(t). \quad (1)$$

其中: $\varphi(t)dt$ 表示制造商的自身努力对回收率的影响; $(\mu - n)\theta(t)dt$ 表示外部因素的影响, μ 为外部激励系数, n 为外部约束系数,系数越大,对回收率的影响越大; $\sigma\sqrt{\theta(t)}dz(t)$ 表示不可控因素对回收率的影响,回收波动率与回收率的平方根成正比. 显然,式 (1) 对于废旧产品的回收率考虑了制造商自身努力、外部因素以及不可控因素的影响.

制造商的目标泛函如下:

$$\begin{aligned} \max_{w(t), \varphi(t)} \Pi_M = & E\left(\int_0^\infty e^{-rt} \left((w - c_m)(1 - \theta) + \right. \right. \\ & \left. \left. (w - \lambda c_r)\theta \right) \times (m - \beta p) - \frac{1}{2}k\varphi^2\right) d\theta(t). \quad (2) \end{aligned}$$

其中: $((w - c_m)(1 - \theta) + (w - \lambda c_r)\theta)(m - \beta p)$ 表示制造商向零售商批发产品所获得的收益, $\frac{1}{2}k\varphi^2$ 表示制造商的回收成本.

零售商的目标泛函如下:

$$\max_{p(t)} \Pi_R = E\left(\int_0^\infty e^{-rt} ((p - w)(m - \beta p)) d\theta(t)\right). \quad (3)$$

制造商和零售商均追求利润的最大化,为使模型简洁起见,模型中省略了时间变量,于是,随机微分博弈模型概括如下:

$$\begin{aligned} \max_{w(t), \varphi(t)} \Pi_M(w; p, \varphi). \\ \text{s.t.} \quad \begin{cases} \max_p \Pi_R(w; p, \varphi); \\ d\theta(t) = (\varphi(t) + (\mu - n)\theta(t))dt + \\ \sigma\sqrt{\theta(t)}dz(t), \theta(0) = \theta_0. \end{cases} \quad (4) \end{aligned}$$

2.2 供应链分散式决策

命题 1 零售商进行销售的最优零售价格为

$$p^* = \frac{m + \beta w}{2\beta}. \quad (5)$$

证明 制造商与零售商之间进行 Stackelberg 博

弈,其中制造商为主导者,零售商为追随者.进行逆向求解,先对零售商阶段决策求解,零售商决策阶段满足动态规划HJB方程

$$rV_R - \frac{1}{2}\sigma^2\theta V_R''(\theta) = \max_p((p-w)(m-\beta p) + (\varphi + (\mu-n)\theta)V_R'(\theta)). \quad (6)$$

其中: V_R 为零售商的最优利润函数, $V_R'(\theta)$ 为其关于回收率的一阶偏导, $V_R''(\theta)$ 为其关于回收率的二阶偏导.再令式(6)为 H_1 ,求 H_1 关于 p 的偏导,得

$$\frac{\partial H_1}{\partial p} = m - 2\beta p + \beta w. \quad (7)$$

令式(7)等于零,即可得到零售商最优零售价格. □

命题2 制造商进行批发的最优批发价格和回收努力为

$$\begin{cases} w^* = \frac{m + \beta(c_m + \theta(\lambda c_r - c_m))}{2\beta}, \\ \varphi^* = \frac{V_M'}{k}. \end{cases} \quad (8)$$

证明 同理可得制造商决策阶段满足动态规划HJB方程

$$rV_M - \frac{1}{2}\sigma^2\theta V_M''(\theta) = \max_{w,\varphi}(((w-c_m)(1-\theta) + (w-\lambda c_r)\theta) \times (m-\beta p) - \frac{1}{2}k\varphi^2 + (\varphi + (\mu-n)\theta)V_M'(\theta)). \quad (9)$$

其中: V_M 为制造商的最优利润函数, $V_M'(\theta)$ 为其关于回收率的一阶偏导, $V_M''(\theta)$ 为其关于回收率的二阶偏导.将式(5)代入(9),并令式(9)为 H_2 ,求 H_2 关于 w 和 φ 的偏导,得

$$\begin{cases} \frac{\partial H_2}{\partial w} = \frac{m-\beta w}{2} - \frac{\beta}{2}(w-c_m + c_m\theta - \lambda c_r\theta), \\ \frac{\partial H_2}{\partial \varphi} = -k\varphi + V_M'. \end{cases} \quad (10)$$

令式(10)等于零,即可得到制造商的批发价格和回收努力最优值. □

命题3 制造商和零售商利润达到最大时的最优值函数如下:

$$\begin{cases} V_M^* = a_1^*\theta^2 + a_2^*\theta + a_3^*, \\ V_R^* = b_1^*\theta^2 + b_2^*\theta + b_3^*. \end{cases} \quad (11)$$

其中

$$a_1^* = \frac{1}{4}((r-2\mu+2n)k + \sqrt{k^2(2\mu-2n-r)^2 - 3\beta k(\lambda c_r - c_m)^2}),$$

$$a_2^* = \frac{\sigma^2 a_1^* + \frac{3}{4}f(\beta c_m - 2m)}{r - \mu + n - \frac{2a_1^*}{k}},$$

$$a_3^* = \frac{4\beta a_2^{*2} + k(m^2 + 3\beta^2 c_m^2 - 4\beta m c_m)}{8k\beta r},$$

$$b_1^* = \frac{\beta f^2}{16(r - 2\mu + 2n - \frac{4a_1^*}{k})},$$

$$b_2^* = \frac{\sigma^2 b_1^* + \frac{1}{8}f(\beta c_m - m) + \frac{2a_2^* b_1^*}{k}}{r - \mu + n - \frac{2a_1^*}{k}},$$

$$b_3^* = \frac{16\beta a_2^* b_2^* + k(m - \beta c_m)^2}{16k\beta r},$$

$$f = \lambda c_r - c_m.$$

证明 将式(5)和(8)代入(6)和(9),得到如下方

程组:

$$\begin{cases} rV_M - \frac{1}{2}\sigma^2\theta V_M''(\theta) = \left(\left(\frac{m + \beta(c_m + \theta(\lambda c_r - c_m))}{2\beta} - c_m \right) (1-\theta) + \left(\frac{m + \beta(c_m + \theta(\lambda c_r - c_m))}{2\beta} - \lambda c_r \right) \theta \right) \times \frac{m - \beta(c_m + \theta(\lambda c_r - c_m))}{4} - \frac{V_M'^2}{2k} + V_M' \left(\frac{V_M'}{k} + (\mu-n)\theta \right), \\ rV_R - \frac{1}{2}\sigma^2\theta V_R''(\theta) = \frac{(m - \beta(c_m + \theta(\lambda c_r - c_m)))^2}{16\beta} + V_R' \left(\frac{V_M'}{k} + (\mu-n)\theta \right). \end{cases} \quad (12)$$

设待定系数为

$$\begin{cases} V_M = a_1\theta^2 + a_2\theta + a_3, \\ V_R = b_1\theta^2 + b_2\theta + b_3. \end{cases} \quad (13)$$

将式(13)以及其一阶、二阶偏导代入(12),根据其恒等关系得

$$ra_1 = \frac{2a_1^2}{k} + 2a_1(\mu-n) + \frac{3}{8}\beta f^2,$$

$$ra_2 = \sigma^2 a_1 + \frac{2a_1 a_2}{k} + a_2 \mu + \frac{3f(\beta c_m - 2m)}{4},$$

$$ra_3 = \frac{a_2^2}{2k} + \frac{m^2}{8\beta} + \frac{3\beta c_m^2 - 4m c_m}{8},$$

$$rb_1 = \frac{4a_1 b_1}{k} + 2b_1(\mu-n) + \frac{1}{16}\beta f^2,$$

$$rb_2 = \sigma^2 b_1 + \frac{1}{k}(2a_1 b_2 + 2a_2 b_1 + b_2 k \mu) +$$

$$\frac{f(\beta c_m - m)}{8},$$

$$rb_3 = \frac{a_2 b_2}{k} + \frac{m^2}{16\beta} + \frac{\beta c_m^2 - 2mc_m}{16}. \quad (14)$$

将待定系数代入式(11),即可得制造商与零售商的最优利润值. □

命题4 制造商回收率的期望及方差如下:

$$E(\theta) = e^{\left(\frac{2a_1}{k} + \mu - n\right)t} \left(\theta_0 + \frac{a_2 k}{2a_1 + (\mu - n)k} (1 - e^{-(n-\mu)t}) \right), \quad (15)$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} E(\theta) = \frac{-a_2}{2a_1 + (\mu - n)k}; \quad (16)$$

$$D(\theta) = \begin{cases} e^{2st} \left(-2\theta_0^2 - \frac{2a_2 + k\sigma^2}{2a_1 + (\mu - n)k} \theta_0 - \frac{a_2 k \sigma^2 + 4a_2^2}{2k^2 s^2} \right) - \\ e^{st} \left(\left(\frac{2a_2 + k\sigma^2}{2a_1 + (\mu - n)k} - \frac{2a_2^2}{k^2 s^2} \right) \theta_0 + \frac{a_2 \sigma^2}{k s^2} \right) + \frac{a_2 \sigma^2}{2k s^2}, \\ s = \frac{2a_1}{k} + \mu - n, \end{cases} \quad (17)$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} D(\theta) = \frac{a_2 \sigma^2}{2k \left(\frac{2a_1}{k} + \mu - n \right)^2}. \quad (18)$$

证明 将式(8)制造商回收努力最优值代入(1),得

$$d\theta(t) = \left(\left(\frac{2a_1}{k} + (\mu - n) \right) \theta(t) + \frac{a_2}{k} \right) dt + \sigma \sqrt{\theta(t)} dz(t), \theta(0) = \theta_0. \quad (19)$$

对式(19)求解即可得制造商回收率的数学期望,当 $\frac{2a_1}{k} + \mu - n < 0$ 时,式(16)成立. 根据式(19)可得

$$d\theta^2 = \left(\left(\frac{4a_1}{k} + 2(\mu - n) \right) \theta^2 + \left(\frac{2a_2}{k} + \sigma^2 \right) \theta \right) dt + 2\sigma \sqrt{\theta} dz(t), \theta^2(0) = \theta_0^2. \quad (20)$$

对式(20)两边同时取期望,可得

$$E(\theta_0^2) = \theta_0^2 + \int_0^t \left(\left(\frac{4a_1}{k} + 2(\mu - n) \right) E(\theta_0^2) + \left(\theta^2 + \left(\frac{2a_2}{k} + \sigma^2 \right) \right) E(\theta_0) \right) dt. \quad (21)$$

将式(15)代入(21),通过 $D(\theta) = E(\theta^2) - (E(\theta))^2$ 可以得到回收率的方差,且当 $\sigma = 0$ 即波动率为零时,方差为零. □

命题5 随着信息隐匿度的增大,制造商和零售商的公开利润都将减小,供应链各方及总体的利润均有不同程度的损失,因此,有必要制定契约进行供应链协调以减小损失.

证明 由于信息隐匿度 λ 在本模型中不受时间因素的影响,可将制造商的利润表示为

$$\Pi_{M'} = ((w - c_m)(1 - \theta) + (w - \lambda c_r)\theta)(m - \beta p) - \frac{1}{2} k \varphi^2. \quad (22)$$

将式(5)和(8)代入(22)并对信息隐匿度 λ 求一阶偏导

$$\frac{\partial \Pi_{M'}}{\partial \lambda} = -\frac{1}{4} c_r \theta (m - \beta(c_m(1 - \theta) + c_r \theta)). \quad (23)$$

由于市场需求 $Q = m - \beta p > 0$,零售价格大于批发价格,即 $p > w$ 且 $w = c_m(1 - \theta) + c_r \theta$,可得一阶偏导小于零,即随着信息隐匿度增大,制造商的利润减小.

零售商的利润表示为

$$\Pi_{R'} = (w - p)(m - \beta p). \quad (24)$$

将式(5)和(8)代入(24)并对信息隐匿度 λ 求一阶偏导

$$\frac{\partial \Pi_{R'}}{\partial \lambda} = -\frac{1}{8} c_r \theta \left(m - \beta \left(c_m(1 - \theta) + \frac{1}{2} c_r \theta \right) \right). \quad (25)$$

同理可得一阶偏导小于零,即随着信息隐匿度增大,零售商的利润减小. □

2.3 供应链协调策略

假设制造商隐匿再制品成本信息,信息隐匿度 λ 在 $[\lambda_l, \lambda_h]$ 上服从某一分布,密度函数为 $h(\lambda)$,分布函数为 $H(\lambda)$. 本文考虑制造商回收率不变的情况下,零售商制定批发价契约使制造商传递真实的再制品成本信息,并以价格 w_B 将产品批发给零售商. 零售商为使制造商签订此契约付出了一定的信息租金,契约如下:

$$\max \int_{\lambda_l}^{\lambda_h} \Pi_{RB}(w_B(\lambda)) h(\lambda) d\lambda. \quad (26)$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} \Pi_{MB}(\lambda) = \max \Pi_M(\bar{\lambda}|\lambda), \\ \Pi_{MB}(\lambda) \geq \Pi_M(\lambda), \\ \Pi_{RB}(\lambda) \geq \Pi_R(\lambda), \\ \Pi_{MB}(\lambda) \geq \Pi_M^{\min}, \\ \lambda_l \leq \lambda \leq \lambda_h. \end{cases} \quad (27)$$

其中: $\Pi_{MB}(\lambda)$ 为制造商传递真实信息 $\lambda = 1$ 时的利润, $\Pi_M(\bar{\lambda}|\lambda)$ 为制造商隐匿成本时的实际利润, Π_M^{\min} 为制造商保留利润. 协调契约中制造商和零售商利润要大于分散决策下各方利润.

命题6 协调契约下零售商的最优零售价格、制造商的最优批发价格和最优回收努力为

$$p_B^* = \frac{1}{2\beta} \left(m + \beta \left((1 - \theta) c_m + \theta \left(\lambda + \frac{H(\lambda)}{h(\lambda)} \right) c_r \right) \right), \quad (28)$$

$$w_B^* = \frac{(m - \beta((1 - \theta)c_m + \theta\lambda c_r))^2 + 8\beta k(\varphi^{*2} - \varphi^2)}{8\beta(m - \beta((1 - \theta)c_m + \theta(\lambda + \frac{H(\lambda)}{h(\lambda)})c_r))} + \frac{(1 - \theta)c_m + \theta c_r}{2} + \frac{1}{4\beta} \left(m + \beta((1 - \theta)c_m + \theta(\lambda + \frac{H(\lambda)}{h(\lambda)})c_r) \right), \quad (29)$$

$$\varphi_B^* = \frac{V'_{MB}}{k}. \quad (30)$$

证明 制造商隐匿成本信息时的利润为

$$\Pi_M(\bar{\lambda}|\lambda) = \Pi_M(\bar{\lambda}) + \theta c_r(\bar{\lambda} - \lambda)(m - \beta p(\lambda)). \quad (31)$$

由命题5可知制造商的利润关于信息隐匿度为减函数,由式(27)知制造商保留利润 $\Pi_M^{\min} = \Pi_M(\lambda_h)$,所以制造商的利润可进一步表示为

$$\Pi_{MB} = \Pi_M^{\min} + \int_{\lambda}^{\lambda_h} \theta c_r(m - \beta p(x))dx, \quad (32)$$

其中积分项是零售商为激励制造商传递真实信息而额外付出的信息租金.从而可将零售商的决策问题进一步优化为

$$\begin{aligned} & \max \int_{\lambda_l}^{\lambda_h} \Pi_{RB}(w_B(\lambda))h(\lambda)d\lambda = \\ & \int_{\lambda_l}^{\lambda_h} (m - \beta p) \times \left(p - (1 - \theta)c_m - \theta c_r \left(\lambda + \frac{H(\lambda)}{h(\lambda)} \right) - \frac{k\varphi^2}{2} \right) h(\lambda)d\lambda - \Pi_M^{\min}. \quad (33) \\ & \text{s.t.} \begin{cases} \Pi_{MB}(\lambda) \geq \Pi_M(\lambda), \\ \Pi_{RB}(\lambda) \geq \Pi_R(\lambda), \\ \lambda_l \leq \lambda \leq \lambda_h. \end{cases} \quad (34) \end{aligned}$$

求式(33)关于零售价格 p 的一阶导数并令其等于零可得最优零售价 p_B^* .将式(22)、(24)代入(34),可得

$$w_{B_{\min}} = \frac{(m - \beta((1 - \theta)c_m + \theta\lambda c_r))^2 - 4\beta k\varphi^2}{8\beta(m - \beta p^*)} + (1 - \theta)c_m + \theta c_r, \quad (35)$$

$$w_{B_{\max}} = p^* - \frac{(m - \beta((1 - \theta)c_m + \theta\lambda c_r))^2}{16\beta(m - \beta p^*)}, \quad (36)$$

$$w_{B_{\max}} \geq w_{B_{\min}}. \quad (37)$$

由于协调契约要使制造商和零售商利润同时达到最大,令 $w_B^* = \frac{w_{B_{\min}} + w_{B_{\max}}}{2}$.由式(9)同理可得协调契约下制造商决策满足HJB方程,从而可得制造商最优回收努力.□

命题7 协调契约下制造商和零售商的最优值函数如下:

$$\begin{cases} V_{MB}^* = a_4^* \theta^2 + a_5^* \theta + a_6^*, \\ V_{RB}^* = b_4^* \theta^2 + b_5^* \theta + b_6^*. \end{cases} \quad (38)$$

其中

$$a_4^* = -\frac{1}{4} \left((r - 2\mu + 2n)k + \sqrt{k^2(2\mu - 2n - r)^2 + \frac{\beta k}{4}z_4 + 32a_1^{*2}} \right),$$

$$a_5^* = \frac{k\sigma^2 a_1^* + 4a_1^* a_2^* + a_4^{*2}}{k(r - \mu + n) - 2ka_4^* + 4a_4^*} + \frac{\frac{k}{32}(-10mz_2 - 4m(\lambda + \frac{H(\lambda)}{h(\lambda)} - 1)) + \frac{\beta k}{16}z_5}{k(r - \mu + n) - 2ka_4^* + 4a_4^*},$$

$$a_6^* = \frac{(2k - 3)a_5^{*2} + 2a_2^{*2}}{2kr} + \frac{3m^2 + 7\beta^2 c_m^2 - 10\beta m c_m}{32\beta r},$$

$$b_4^* = \frac{\frac{-2(a_4^{*2} - a_1^{*2})}{k} + \frac{\beta}{16}(z_1 z_3 - z_2^2)}{r - 2\left(\frac{2a_4^*}{k} + \mu - n\right)},$$

$$b_5^* = \frac{(2a_5^* + \sigma^2)b_4^* - \frac{2(a_4^* a_5^* - a_1^* a_2^*)}{k}}{r - \mu + n - \frac{2a_4^*}{k}} + \frac{\frac{c_m}{16}z_6 + \frac{m(-4z_1 + z_2)}{8}}{r - \mu + n - \frac{2a_4^*}{k}},$$

$$b_6^* = \frac{1}{r} \left(a_5^* b_5^* - \frac{a_5^{*2} - a_2^{*2}}{2k} + \frac{m^2 - 2\beta(c_m^2 - z_3^2 + 3m c_m)}{16\beta} \right),$$

$$z_1 = \lambda c_r - c_m,$$

$$z_2 = c_r - c_m,$$

$$z_3 = \left(\lambda + \frac{H(\lambda)}{h(\lambda)} \right) c_r - c_m,$$

$$z_4 = z_2^2 + z_3(2z_2 - z_1 + 2),$$

$$z_5 = -2z_1 + 5z_2 + 4z_3,$$

$$z_6 = -4z_3 + \beta(z_1 + z_3 - 2z_2).$$

证明 将式(28)~(30)代入(6)和(9),式(12)可进一步优化为

$$\begin{aligned} & rV_{MB} - \frac{1}{2}\sigma^2\theta V_{MB}''(\theta) = \\ & \frac{(m - \beta A)^2 + 2(m - \beta A_+)^2}{32\beta} + \\ & \frac{(m - \beta A_+)(A_- - 2A)}{8} - \frac{3V_{MB}^{\prime 2}}{4k} + \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&V'_{MB} \left(\frac{V'_{MB}}{k} + (\mu - n)\theta \right), \\
&rV_{RB} - \frac{1}{2}\sigma^2\theta V''_{RB}(\theta) = \\
&\frac{2mA - 2A_+^2 - \beta A^2}{16} - \frac{A_-(8m + \beta A_+)}{16} + \\
&\frac{m^2 + 8k\beta(\varphi^{*2} - \varphi^2)}{16\beta} + V'_{RB} \left(\frac{V'_{MB}}{k} + (\mu - n)\theta \right), \\
&A = c_m + \theta(\lambda c_r - c_m), \\
&A_- = c_m + \theta(c_r - c_m), \\
&A_+ = c_m + \theta \left(\left(\lambda + \frac{H(\lambda)}{h(\lambda)} \right) c_r - c_m \right). \tag{39}
\end{aligned}$$

设待定系数如下式所示:

$$\begin{cases} V_{MB} = a_4\theta^2 + a_5\theta + a_6, \\ V_{RB} = b_4\theta^2 + b_5\theta + b_6. \end{cases} \tag{40}$$

同理可得各待定系数. □

3 算例分析

本节通过算例对闭环供应链均衡策略进行分析, 比较分散决策和协调契约下信息隐匿度等参数对供应链各方的影响. 假设零售商从与供应商的历史交易数据中获知制造商进行再制造的单位成本信息的隐匿度 λ 在 $[\lambda_l, \lambda_h]$ 上服从均匀分布, 参数赋值如下: $c_m = 6, c_r = 2, m = 100, \lambda = 1, \beta = 2, \gamma_l = 1, \gamma_h = 2, \sigma = 0.03, \mu = 1, n = 3, r = 0.12, k = 80$.

3.1 参数灵敏度分析

回收率不仅受到制造商自身回收努力的影响, 还受到制造商信息隐匿程度、需求对价格的敏感系数、外部激励系数和外部约束系数的影响. 图1~图3为分散决策下不同参数对回收率的影响以及回收率的演化过程.

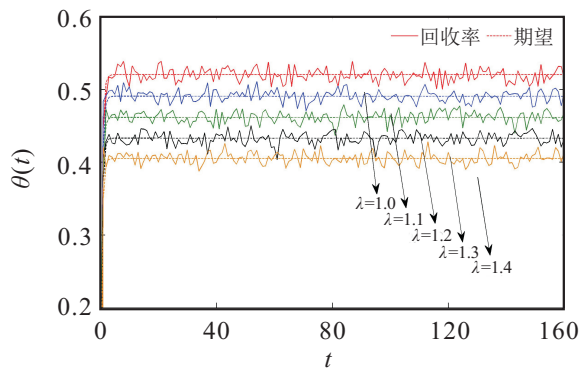


图1 参数 λ 对回收率的影响

由图1回收率的动态演化过程可知, 系统的回收率在较短时间内达到稳定值, 由于受到不确定因素影响, 回收率在稳定值上下波动. $\lambda = 1.0$ 表示信息公开, 制造商不隐匿再造品成本信息, 此时回收率最

大; λ 越大表示制造商信息隐匿程度越大, 越高报再造品的成本信息. 随着信息隐匿度的增大, 回收率呈减小趋势, 主要因为制造商高报再造品成本使回收努力成本增加, 回收率的降低能减少回收努力成本从而保证制造商的利润, 故回收率减小.

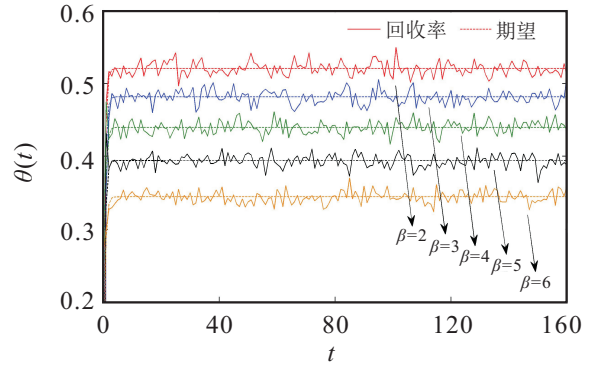


图2 参数 β 对回收率的影响

图2表明了需求对零售价格的敏感系数对回收率的影响, 回收率随着时间的推移和不确定因素的影响而动态地变化. 敏感系数与回收率呈负相关, 敏感系数增大时, 系统的回收率减小. 敏感系数越大表示需求对零售价格越敏感, 即随着零售价格的增大, 需求减小得越快, 需求的减小降低了回收率. 回收率的降低速率随敏感系数的等幅增加而逐渐加快, 可见较大的敏感系数对回收率影响较大.

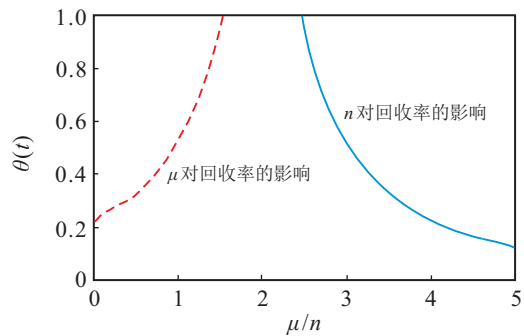


图3 参数 μ, n 对回收率的影响

图3表示外部激励系数和外部约束系数对回收率的影响. 外部激励系数在一定阈值内增加会提高回收率, 而外部约束系数在一定阈值内增加会降低回收率. 影响外部激励系数的因素包括政府对回收再造的补贴激励、社会各界的宣传等; 影响外部约束系数的因素包括回收商的竞争等. 外部激励系数对回收率的影响大于外部约束系数时, 使回收率变化得更快, 可见外部激励更能有效提高回收率.

3.2 契约效果分析

当信息隐匿度 λ 和回收率 θ 取不同值时, 分散决策下和引入批发价格契约协调下二者对供应链各方利润的影响如表1所示.

表1 分散与协调契约下 λ 和 θ 对利润的影响

λ	θ	分散决策		协调契约	
		制造商利润	零售商利润	制造商利润	零售商利润
1.0	0.2	3284.18	2204.80	42958.09	47266.37
	0.4	3300.57	2209.26	42972.06	47282.36
	0.6	3317.19	2213.76	42986.03	47298.35
1.1	0.2	3248.52	2185.07	34386.09	41730.48
	0.4	3264.02	2189.28	34398.47	41746.36
	0.6	3279.73	2193.53	34410.86	41762.23
1.2	0.2	3215.11	2166.69	27342.49	36716.31
	0.4	3229.72	2170.65	27353.41	36732.11
	0.6	3244.52	2174.65	27364.33	36747.91
1.3	0.2	3183.88	2149.57	21532.74	32106.65
	0.4	3197.62	2153.29	21542.28	32122.40
	0.6	3211.54	2157.04	21551.83	32138.15
1.4	0.2	3154.72	2133.69	16744.11	27811.69
	0.4	3167.60	2137.17	16752.35	27827.42
	0.6	3180.64	2140.68	16760.58	27843.16

由表1可知,信息隐匿会降低制造商的公开利润和零售商的实际利润,且对制造商的影响更大.信息隐匿度不断增大表示制造商高报再造品成本信息的力度增大.制造商高报成本信息的主要动机是为了制造行业壁垒、获取更高额的补贴等,但从表1中的利润可知,制造商隐匿成本不仅降低了自身利润,还影响了供应链成员,降低了零售商利润.回收率与制造商和零售商的利润呈正相关,提高回收率可增加制造商和零售商的利润.协调契约下各方利润均大于分散决策下,利润值随信息隐匿度增大而减小得更慢,从而表明了协调契约的有效性.

当信息隐匿度 λ 和回收率 θ 取不同值时,分散决策下和引入批发价格契约协调下二者对各决策变量的影响如表2所示.

由表2可知,信息隐匿度和回收率对制造商和零售商决策变量的影响有以下几点:

1) 随着信息隐匿度的增加,批发价格和销售价格有不同程度的提高,其中批发价格对信息隐匿度更为敏感.制造商的回收努力有所减小,主要因为信息隐匿的增加降低了回收率,减少了回收活动,从而使得回收努力成本减小.

2) 回收率的提高会降低批发价格与零售价格,增加回收努力成本,其中批发价格降低得更为显著,主要因为进行回收活动所降低的制造成本带来的影响大于所增加的回收努力成本带来的影响,但回收努力成本增加幅度不大,可见回收率对回收努力成本影响较小,而回收努力对回收率的影响较大.

表2 分散与协调契约下 λ 和 θ 对决策变量的影响

λ	θ	分散决策			协调契约		
		批发价何	零售价格	回收努力	批发价何	零售价格	回收努力
1.0	0.2	27.60	38.80	1.017	21.86	27.60	0.873
	0.4	27.20	38.60	1.032	21.34	27.20	0.874
	0.6	26.80	38.40	1.046	20.83	26.80	0.875
1.1	0.2	27.62	38.81	0.962	21.83	27.64	0.773
	0.4	27.24	38.62	0.976	21.34	27.28	0.774
	0.6	26.86	38.43	0.989	20.84	26.92	0.775
1.2	0.2	27.64	38.82	0.908	21.82	27.68	0.682
	0.4	27.28	38.64	0.920	21.35	27.36	0.683
	0.6	26.92	38.46	0.932	20.87	27.04	0.684
1.3	0.2	27.66	38.83	0.854	21.80	27.72	0.598
	0.4	27.32	38.66	0.864	21.35	27.44	0.599
	0.6	26.98	38.49	0.875	20.90	27.16	0.600
1.4	0.2	27.68	38.84	0.800	21.79	27.76	0.514
	0.4	27.36	38.68	0.810	21.36	27.52	0.515
	0.6	27.04	38.52	0.819	20.93	27.28	0.516

3) 协调契约下的各决策变量较分散决策下有所减小且变化幅度更为缓慢,主要因为信息非对称带来的影响会沿着供应链逐级放大,制造商和零售商都会提高销售价格以保证其利润.协调契约通过揭示私有信息,降低了供应链成员对产品的售价,并减缓了决策变量的变化速度,从而减小了信息非对称带来的损失,同时还降低了制造商的回收努力成本.

4 结论

本文研究了信息非对称下制造商进行回收行为的闭环供应链协调问题,考虑了随时间变化的动态回收率和制造商隐匿再造品成本信息情形.通过构建分散决策模型得到制造商和零售商的最优策略,并引入了批发价格契约进行协调,以减小分散决策及信息隐匿带来的损失.运用伊藤过程刻画了回收率随机演化的过程,分析了信息隐匿程度等参数对回收率和供应链成员均衡策略的影响.通过Matlab进行数值仿真,验证了协调契约的有效性.

本文研究结论如下:

1) 随着时间的推移,回收率在较短时间内达到稳定值并在稳定值上下波动.信息隐匿度和需求对零售价格的敏感系数与回收率成负相关,回收率的提高会降低批发价格与零售价格.

2) 外部激励对回收率的影响大于外部约束因素,可有效提高回收率.

3) 信息隐匿降低了供应链成员及整体利润且对制造商影响更大,随着信息隐匿程度的增大,提高了批发价格和零售价格,其中批发价格相较零售价格更

为敏感。

4) 协调契约增加了制造商和零售商及供应链整体的利润,减小了由信息非对称和分散决策提高的批发价格和零售价格,并降低了回收努力成本。随着信息隐匿度的增大,各决策变量及利润值的变化速率均有所减缓,减小了信息隐匿对闭环供应链的影响。

本文考虑了制造商再制品成本信息为私有的情形,但在现实中零售商对市场需求更加了解,存在信息双边的不对称及激烈的市场竞争。考虑信息双边的不对称以及竞争环境将是未来研究的重点。

参考文献(References)

- [1] Modak N M, Panda S, Sana S S. Two-echelon supply chain coordination among manufacturer and duopolies retailers with recycling facility[J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2016, 87(5/6/7/8): 1531-1546.
- [2] Raz G, Souza G C. Recycling as a strategic supply source[J]. *Production and Operations Management*, 2018, 27(5): 902-916.
- [3] Modak N M, Modak N, Panda S, et al. Analyzing structure of two-echelon closed-loop supply chain for pricing, quality and recycling management[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 171: 512-528.
- [4] Giri B C, Dey S K. Game theoretic analysis of a closed-loop supply chain with backup supplier under dual channel recycling[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2019(129): 179-191.
- [5] Jafari H, Hejazi S R, Rasti-Barzoki M. Sustainable development by waste recycling under a three-echelon supply chain: A game-theoretic approach[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 142: 2252-2261.
- [6] Arshad M, Khalid Q, Lloret J, et al. An efficient approach for coordination of dual-channel closed-loop supply chain management[J]. *Sustainability*, 2018, 10(10): 3433-3453.
- [7] Li X J, Ai X Z, Tang X W. Research on collecting strategies in the closed-loop supply chain with chain to chain competition[J]. *Journal of Industrial Engineering and Engineering Management*, 2016, 30(3): 90-98.
- [8] Hong X P, Wang Z J, Zhao D. Pricing models of closed-loop supply chain and decisions on collecting channel selection[J]. *Chinese Journal of Management*, 2012, 9(12): 1848-1855.
- [9] Li L, Liu Z Y, Li Z L, et al. Manufacturer's acquisition strategy choice under supply uncertainty: Recycling or dual-channel procurement[J]. *Industrial Engineering and Management*, 2020, 25(2): 74-81.
- [10] Huang Z S, Nie J J, Tsai S B. Dynamic collection strategy and coordination of a remanufacturing closed-loop supply chain under uncertainty[J]. *Sustainability*, 2017, 9(5): 683-700.
- [11] Wu H Y, Han X H, Yang Q X, et al. Production and coordination decisions in a closed-loop supply chain with remanufacturing cost disruptions when retailers compete[J]. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 2018, 29(1): 227-235.
- [12] Han X H, Wu H Y, Yang Q X, et al. Collection channel and production decisions in a closed-loop supply chain with remanufacturing cost disruption[J]. *International Journal of Production Research*, 2017, 55(4): 1147-1167.
- [13] Zhao L, Mu Z Y. Emergency channel decisions of closed-loop supply chain with production diseconomies under demand disruptions[J]. *Chinese Journal of Management Science*, 2019, 27(7): 68-82.
- [14] Zheng B R, Yang C, Liu C. The effect of cost sharing on manufacturer collecting closed loop supply chain[J]. *Systems Engineering—Theory & Practice*, 2017, 37(9): 2344-2354.
- [15] Chen S L, Zhang C J. Bargaining coordination strategy of closed-loop supply chain with consideration of environmental performance and remanufacturability[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2019, 25(5): 1283-1295.
- [16] Hong I H, Dang J F, Lin K W. The equilibrium contract rent and reward money under incomplete information in reverse supply chains: A game theoretical approach and computational study[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2016(102): 69-77.
- [17] Zheng B R, Yang C, Yang J, et al. Pricing, collecting and contract design in a reverse supply chain with incomplete information[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2017, 111: 109-122.
- [18] Wang W B, Zhao X J, Zhang P, et al. Incentive mechanism of closed-loop supply chain under double information asymmetry[J]. *Chinese Journal of Management Science*, 2016, 24(10): 69-77.
- [19] Li F, Shan D Y, Hong J, et al. Incentive contract design of reverse supply chain with continuous type of information asymmetry[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2016, 22(7): 1726-1732.
- [20] Ji X H, Zhang M, Li Y L. Research on the incentive mechanism of reverse supply chain of electronic products under asymmetric information[J]. *Journal of Industrial Technological Economics*, 2018, 37(11): 75-83.
- [21] Zhang P, Xiong Z K. Designing incentive contract for a retailer under asymmetric information of manufacturer's collection cost[J]. *Journal of Industrial Engineering and Engineering Management*, 2019, 33(4): 144-150.
- [22] Ma D Q, Hu J S. Study on dynamic equilibrium strategy of closed-loop supply chain with retailers' fair behavior and retailer recycling[J]. *Chinese Journal of Management Science*, 2019, 27(4): 70-78.

作者简介

王道平(1964—),男,教授,博士生导师,从事供应链管理、知识管理等研究, E-mail: dpwang@ustb.edu.cn;

梁思涵(1997—),女,硕士生,从事供应链管理的研究, E-mail: liangsh312@163.com;

王婷婷(1990—),女,博士生,从事供应链管理的研究, E-mail: wang_tt926@163.com.

(责任编辑:李君玲)