

公平关切与创新投入下的闭环供应链决策优化研究

米力阳^{1,2a}, 尚春燕^{2b}

(1. 东北大学 工商管理学院, 辽宁 沈阳 110169;

2. 宁夏理工学院 a. 理学与化学工程学院, b. 经济与管理学院, 宁夏 石嘴山 753000)

[摘要]考虑回收商公平关切与制造商创新投入问题,分别构建公平关切和创新投入与否的闭环供应链决策模型,并针对回收商不利不公平厌恶设计基于成本分担的供应商前向整合契约,探讨公平关切程度、创新成功率和成本分担比例对供应链决策的影响。研究发现,回收商对公平的关注是回收系统内部利润分配的一种手段,也是一种“利己损他”行为。创新成功率的提高,有助于供应链系统利润的增长,但供应商“搭便车”的行为不利于制造商创新和供应链长期稳健性。当公平关切程度和成本分担比例满足一定条件时,基于成本分担的供应商前向整合契约不仅能避免回收商“利己损他”行为,约束供应商“搭便车”的机会主义行为,还能进一步优化决策模型,实现供应链 Pareto 改进。

[关键词]公平关切;闭环供应链;创新投入;成本分担;废弃物回收;供应链创新;生产者责任延伸

[中图分类号]C934;F272.3 **[文献标志码]**A **[文章编号]**2096-3114(2022)04-0102-10

一、引言

科技发展和激烈的市场竞争使得电子电器产品更新换代周期日益缩短,这也使得“报废”或“被报废”的各类智能手机、计算机、家用电器等电子电器产品增量巨大,导致电子废弃物已成为全球增长最快的家庭垃圾。联合国发布的《2020 全球电子垃圾监测》报告显示,2019 年全球产生了 5360 吨电子废弃物,其中只有 17.4% 的电子废弃物被收集回收。近年来,我国在部分电子电器产品领域探索生产者责任延伸制度,取得了良好的效果,为进一步推行这一制度,国务院印发《生产者责任延伸制度推行方案》指出,到 2025 年,废弃产品规范回收与循环利用率平均达到 50%。从长远来看,生产者责任制不只是建立产品回收体系,而是在实施废弃物回收利用的过程中,鼓励生产企业通过产品设计和研发创新,努力防止在产品寿命周期内对环境的污染,以此推动资源循环利用和产业链升级。众所周知,闭环供应链是实现这一方向和目标的重要手段,因此有必要对供应链的回收再造和研发创新进行深入的研究。

二、文献综述

(一) 关于供应链回收再制造的研究

随着科技的迅速发展,电子电器废旧产品不断增多,致使电子废弃物中的有害物质对环境的危害日益严重。但是,废弃电子电器产品中有许多不可多得的宝贵资源,而且从再生途径获得这些资源的成本远低于从矿石、煤炭、石油等原材料冶炼加工获取的成本。Islam 等提出电子废弃物的回收将是宝贵稀土元素的重要来源,具有巨大的经济价值和社会、环境效益^[1]。2019 年 3 月 2 日,我国对《废弃电器电子产品回收处理管理条例》进行了修正,标志着我国废弃电子电器产品的回收处理迈向更加规范化、集

[收稿日期]2021-12-28

[基金项目]国家自然科学基金资助项目(71772035);宁夏高等学校科学研究项目(NGY2020094)

[作者简介]米力阳(1978—),男,宁夏中卫人,东北大学工商管理学院博士生,宁夏理工学院理学与化学工程学院讲师,主要研究方向为应用数学与供应链运作管理,邮箱:2216012417@qq.com;尚春燕(1980—),女,黑龙江大庆人,宁夏理工学院经济管理学院副教授,博士,主要研究方向为市场营销与供应链管理。

中化的发展过程。

在废旧产品回收方面,国内外学者从政府规制^[2-4]、回收渠道选择^[5-7]的视角进行了广泛研究。如 Saha 等研究了在奖励机制下闭环供应链的定价与协调^[2];王喜刚,尚春燕等建立政府补贴下的博弈模型,从社会福利最大化的角度探讨回收定价与政府补贴策略^[3-4];而 Feng 等构建传统回收渠道模式、在线回收渠道模式和混合双回收渠道模式,从消费者回收偏好的角度研究了回收渠道选择问题^[5]。类似地,卞文良等通过考虑维修中心参与回收,构建回收商单回收渠道模式、回收商与维修中竞争的双回收渠道模式,从回收数量和回收渠道竞争程度方面对回收模式的选择进行了研究^[7],但上述研究均没有考虑提供回收增值服务对回收决策的影响情况。

(二) 关于供应链创新的研究

创新不仅是企业发展的不竭动力,还是有效降低生产成本的主要方式。现在很多企业把主要精力集中在产品创新方面,因为生产技术越先进,创新越多,企业竞争力越强。目前来看,以供应链创新为研究背景的文献主要集中于自主创新^[8-11]和合作创新两方面^[12-14]。如杨天剑等通过考虑制造商实施绿色创新策略,构建不同权力结构博弈模型,运用博弈论的方法对比分析不同权力结构下产品绿色度和绿色创新效率^[11]。随着竞争环境的日益复杂,企业可用资源约束性增多,合作创新成为企业利用外部资源、降低技术研发风险、实现优势互补和增强核心竞争力的有效手段。Fiala 认为发展长期稳定的合作关系可以显著提升供应链的整体绩效并确保其竞争优势^[12],单而芳等研究发现,创新联盟有助于供应链总收益的最大化^[13],Yang 等认为创新投入和收益分配比例都是影响创新联盟稳定性的关键因素^[14]。虽然上述文献对创新问题进行了研究,但尚未涉及创新投入导致的公平关切问题,而现实中投资者不仅关心自身获取的投资收益,还会关注收益的公平性,进而表现出偏好公平的行为特征^[15-16]。

与本文研究较为相关的是曹晓刚等和王玉燕等的研究。曹晓刚等研究的是新产品与再制品存在价格竞争的闭环供应链差别定价决策,未考虑创新投入与回收增值服务^[17];王玉燕等在零售商公平关切下,虽然讨论了创新投入对闭环供应链定价决策的影响,但未涉及回收增值服务^[18]。然而实践中,除产品研发创新外,有效提高服务水平同样是推动企业高质量发展的重要支撑。因此,研究创新投入和提供增值服务有重要的现实意义。

本文可能的研究贡献体现在:首先,将制造商产品研发创新和回收商提供回收增值服务纳入闭环供应链决策中,同时聚焦于供应商双重“搭便车”行为而导致的供应链成员公平关切问题;其次,鲜有文献研究供应链成员间的整合契约,因此本文针对回收商不利不公平厌恶,设计基于成本分担的供应商前向整合契约,探讨公平关切、创新成功率和成本分担比例对闭环供应链协调的影响机理。

三、问题描述与基准模型构建

(一) 问题描述

在制造商、供应商和回收商组成的闭环供应链系统中,上游供应商生产一种零部件产品,下游制造商生产每个产成品只包含一件该零部件,回收商以回收价从顾客手中回收电子废旧产品。为节约资源,供应商一方面用新材料生产零部件,另一方面从回收商处以回收转移价收购废旧电子产品,拆解处理后作为原材料再利用。为了便于分析,本文作如下假设。

假设 1:市场需求是关于价格的线性函数,即 $q = \xi - \alpha p$,式中 ξ 为市场潜在需求量, α 为价格敏感系数, p 为零售价格,除零部件的批发价 w 外,制造商生产每件产成品的其他加工成本为 c_m ,单位产品销售利润为 m 。

假设 2:为避免产品因性能落后逐步被新兴市场淘汰,制造商考虑通过研发创新进一步降低产品生产成本,提高产品性能,以此扩大新兴市场份额。假定创新成功的概率为 ϕ ($0 < \phi \leq 1$),创新后单位产品期望成本为 $\phi(c_m - e_m) + (1 - \phi)c_m = c_m - \phi e_m$,其中 e_m 为创新后单位产品加工成本降低额,这里 e_m

可表示为创新程度。与众多学者类似,本文假设创新投入 $C_m(e_m)$ 是创新程度的凸函数,以二次函数的形式刻画^[13,18],即创新投入为 $C_m(e_m) = \eta e_m^2/2$, $\eta > 0$ 为创新成本系数。

假设3:供应商用新材料与利用电子废弃物回收拆解提取的再利用材料生产的零部件在质量、功能和售价上均无差别,用新材料生产零部件的单位成本为 c_s ,用回收再利用材料生产零部件的单位成本为 c_{s0} ,另外从回收商处以回收转移价 p_s 回购的废旧产品需要进行拆解处理,每件电子废旧产品平均拆解处理成本为 F ,为保证回收获利^[18-19], $c_s - c_{s0} - p_s - F > 0$ 。

假设4:回收商除日常回收工作外,考虑为顾客提供信息咨询、上门回收、专业质量检测等增值服务。电子电器废旧产品的回收量 d 是回收价 p_c 和增值服务水平 s 的线性函数,假设回收商的服务成本函数是服务水平的二次函数^[20],即 $C_c(s) = ks^2/2$,其中 $k > 0$ 为服务成本系数。

此外,文中下标 s 代表供应商, m 代表制造商, c 代表回收商;上标 N 表示基准模型, Y 表示考虑回收商公平关切和制造商创新投入的决策模型, C 表示供应商前向整合契约模型, $\pi_s^{i(1)}$ 表示供应商生产环节利润, $\pi_s^{i(2)}$ 表示供应商回收环节利润,其中 $i = N, Y, C$ 。

(二) 基准模型构建(N)

在制造商未创新投入、回收商不提供增值服务时,单位产品生产成本为 c_m ,零售价为 $p = w + c_m + m$,则 $q = \xi - \alpha w - \alpha c_m - \alpha m$,回收量为 $d = \beta p_c$, β 为回收价敏感系数,因而供应链成员的利润函数为:

$$\begin{cases} \pi_m = m(\xi - \alpha w - \alpha c_m - \alpha m) \\ \pi_s = (w - c_s)(\xi - \alpha w - \alpha c_m - \alpha m) + \beta p_c(c_s - c_{s0} - p_s - F) \\ \pi_c = \beta p_c(p_s - p_c) \end{cases} \quad (1)$$

制造商作为供应链的领导者,首先确定单位产品销售利润 m ,然后供应商确定零部件批发价 w 和废旧产品回收转移价 p_s ,最后回收商确定回收价 p_c ,采用逆向归纳法求解可得命题1。

命题1:不考虑创新投入和增值服务的闭环供应链决策均衡结果为:

$$(1) \text{ 决策均衡解: } w^N = \frac{\xi + 3\alpha c_s - \alpha c_m}{4\alpha}, p^N = \frac{3\xi + \alpha c_s + \alpha c_m}{4\alpha}, m^N = \frac{\xi - \alpha c_s - \alpha c_m}{2\alpha}, p_s^N = \frac{c_s - c_{s0} - F}{2}, p_c^N = \frac{c_s - c_{s0} - F}{4}。$$

$$(2) \text{ 需求量和回收量: } q^N = \frac{\xi - \alpha c_s - \alpha c_m}{4}, d^N = \frac{\beta(c_s - c_{s0} - F)}{4}。$$

$$(3) \text{ 制造商、回收商和供应商的利润分别为: } \pi_m^N = \frac{(\xi - \alpha c_s - \alpha c_m)^2}{8\alpha}, \pi_c^N = \frac{\beta(c_s - c_{s0} - F)^2}{16}, \pi_s^N = \frac{(\xi - \alpha c_s - \alpha c_m)^2}{16\alpha} + \frac{\beta(c_s - c_{s0} - F)^2}{8}。$$

进一步,要保证模型经济可行性,需求量须大于0,即 $\xi - \alpha c_s - \alpha c_m > 0$ 。

四、考虑公平关切与创新投入的决策模型

随着生产技术的不断发展和消费观念的转变,顾客对产品性能和服务有了更高要求,为了赢得市场,供应链成员往往存在产品创新和提升服务水平的意愿,因而在制造商创新投入、回收商提供增值服务时,零售价、需求量和回收量分别为: $p = w + (c_m - \phi e_m) + m$, $q = \xi - \alpha w - \alpha c_m - \alpha m + \alpha \phi e_m$, $d = \beta p_c + s$ 。作为供应链跟随者,回收商在提供增值服务后,不仅关注自身利润,同时也会以供应商的利润作为参考点来衡量自身收益的公平性。下面构建回收商公平关切与制造商创新投入的决策模型。

(一) 公平关切与创新投入下的决策模型(Y)

在制造商创新投入、回收商提供增值服务时,供应链成员利润为:

$$\begin{cases} \pi_m = m(\xi - \alpha w - \alpha c_m - \alpha m + \alpha \phi e_m) - \frac{1}{2}\eta e_m^2 \\ \pi_s = (w - c_s)(\xi - \alpha w - \alpha c_m - \alpha m + \alpha \phi e_m) + (c_s - c_{s0} - p_s - F)(\beta p_c + s) \\ \pi_c = (p_s - p_c)(\beta p_c + s) - \frac{1}{2}ks^2 \end{cases} \quad (2)$$

进一步,参考 Fehr 等的不公平厌恶模型^[21],本文将回收商公平关切的效用函数表示为:

$$U_c = \pi_c - \theta_c(\pi_s - \pi_c) \quad (3)$$

式(3)中 U_c 表示回收商的效用, π_c 为其利润, π_s 为供应商的实际利润, $\theta_c \in [0, +\infty)$ 表示回收商公平关切程度,若 $\theta_c = 0$ 表示决策者公平中性, $\theta_c \rightarrow +\infty$ 表示决策者对公平极度关注。利用逆向归纳法求解式(2)和式(3)可得命题2。

命题2:当 $4\eta - \alpha\phi^2 > 0$, $k\beta - 1 > 0$ 时,公平关切与创新投入下的闭环供应链决策均衡结果为:

$$(1) \text{ 决策均衡解为: } w^Y = \frac{\eta(\xi - \alpha c_m) + \alpha c_s(3\eta - \alpha\phi^2)}{\alpha(4\eta - \alpha\phi^2)}, p^Y = \frac{\xi(3\eta - \alpha\phi^2) + \eta(\alpha c_s + \alpha c_m)}{\alpha(4\eta - \alpha\phi^2)}, m^Y = \frac{2\eta(\xi - \alpha c_s - \alpha c_m)}{\alpha(4\eta - \alpha\phi^2)}, e_m^Y = \frac{\phi(\xi - \alpha c_s - \alpha c_m)}{4\eta - \alpha\phi^2}, p_s^Y = \frac{(c_s - c_{s0} - F)(1 + 3\theta_c)}{2(1 + 2\theta_c)}, p_c^Y = \frac{(k\beta - 1)(c_s - c_{s0} - F)}{2(2k\beta - 1)}, s^Y = \frac{\beta(c_s - c_{s0} - F)}{2(2k\beta - 1)}。$$

$$(2) \text{ 需求量和回收量为: } q^Y = \frac{\eta(\xi - \alpha c_s - \alpha c_m)}{4\eta - \alpha\phi^2}, d^Y = \frac{k\beta^2(c_s - c_{s0} - F)}{2(2k\beta - 1)}。$$

$$(3) \text{ 制造商、回收商和供应商的利润分别为: } \pi_m^Y = \frac{\eta(\xi - \alpha c_s - \alpha c_m)^2}{2\alpha(4\eta - \alpha\phi^2)}, \pi_c^Y = \frac{k\beta^2(c_s - c_{s0} - F)^2(1 + 4\theta_c)}{8(2k\beta - 1)(1 + 2\theta_c)}, \pi_s^Y = \frac{1}{\alpha} \left[\frac{\eta(\xi - \alpha c_s - \alpha c_m)}{4\eta - \alpha\phi^2} \right]^2 + \frac{k\beta^2(c_s - c_{s0} - F)^2(1 + \theta_c)}{4(2k\beta - 1)(1 + 2\theta_c)}。$$

显然,当 $\phi = 0$ 时,供应链生产环节退化无创新情形,并且在创新成本系数和服务成本系数很大时,有 $\lim_{\eta \rightarrow +\infty} e_m^Y = 0$, $\lim_{k \rightarrow +\infty} s^Y = 0$,意味着当创新成本和服务成本很高时,制造商将不会进行创新投入,回收商也不会提供增值服务。

$$\text{推论 1: } \frac{\partial p_s^Y}{\partial \theta_c} > 0, \frac{\partial p_c^Y}{\partial \theta_c} = \frac{\partial s^Y}{\partial \theta_c} = \frac{\partial d^Y}{\partial \theta_c} = 0; \frac{\partial \pi_s^Y}{\partial \theta_c} < 0, \frac{\partial \pi_c^Y}{\partial \theta_c} > 0。$$

结论 1: $p_s^Y \geq p_s^N, p_c^Y < p_c^N, d^Y > d^N, \pi_c^Y > \pi_c^N, (\pi_c^Y + \pi_s^{Y(2)}) - (\pi_c^N + \pi_s^{N(2)}) = \frac{3\beta(c_s - c_{s0} - F)^2}{16(2k\beta - 1)}$, 并且当 $\theta_c > \frac{1}{2(k\beta - 1)}$ 时, $\pi_s^{Y(2)} < \pi_s^{N(2)}$ 。特别地,在 $\theta_c = 0$ 时,有 $p_s^Y = p_s^N, \pi_c^Y > \pi_c^N, \pi_s^{Y(2)} > \pi_s^{N(2)}$ 。

结合推论 1、结论 1 可知,当回收商为公平中性时,回收转移价保持不变,但回收商和供应商回收环节利润均提高,说明回收商提供增值服务有助于提高回收环节收益,同时供应商存在“搭便车”现象。值得注意的是,当回收商存在公平关切时,其公平关切对回收价、服务水平和回收量均不产生影响,但会促使供应商提高回收转移价,进而增加自身利润,降低供应商回收环节利润,这表明公平关切是回收商抑制供应商对其提供增值服务“搭便车”的有效措施,是回收系统内部利润分配的一种手段,然而随着回收商公平关切程度的提高,供应商回收环节的利润会出现低于回收商不提供增值服务时的情形,因而回收商公平关切也是一种“利己损他”行为。

$$\text{推论 2: } \frac{\partial w^Y}{\partial \phi} > 0, \frac{\partial p^Y}{\partial \phi} < 0, \frac{\partial m^Y}{\partial \phi} > 0, \frac{\partial e_m^Y}{\partial \phi} > 0, \frac{\partial q^Y}{\partial \phi} > 0; \frac{\partial \pi_m^Y}{\partial \phi} > 0, \frac{\partial \pi_s^Y}{\partial \phi} > 0。$$

$$\text{结论 2: } w^Y > w^N, p^Y < p^N, m^Y > m^N, q^Y > q^N; \pi_m^Y > \pi_m^N, \pi_s^{Y(1)} > \pi_s^{N(1)}, \pi_m^Y + \pi_s^{Y(1)} > \pi_m^N + \pi_s^{N(1)}。$$

推论 2 和结论 2 表明, 供应商和制造商能够从创新中获益。这是因为创新成功率的提高会促使制造商增加创新投入, 从而提高创新程度, 这就意味着创新对产品生产成本降低的贡献增大, 因而随着创新成功率的提高, 制造商单位产品生产成本降低, 使得其单位产品利润空间增大。相应地, 为从制造商创新中分一杯羹, 供应商乘机提高批发价。与此同时, 制造商通过适度降低零售价, 让利于消费者以提升市场占有率, “渗透定价”策略致使供应链生产环节利润增加。

不妨记 $\Delta\pi_m^{YN} = \pi_m^Y - \pi_m^N, \Delta\pi_s^{YN} = \pi_s^{Y(1)} - \pi_s^{N(1)}$, 其中 $\pi_s^{N(1)} = \frac{(\xi - \alpha c_s - \alpha c_m)^2}{16\alpha}$, $\pi_s^{Y(1)} = \frac{\eta^2(\xi - \alpha c_s - \alpha c_m)^2}{\alpha(4\eta - \alpha\phi^2)^2}$, 尽管 $\Delta\pi_m^{YN} > 0, \Delta\pi_s^{YN} > 0$, 但始终有 $\Delta\pi_m^{YN} < \Delta\pi_s^{YN}$ 。这就表明, 虽然制造商通过创新投入使供应链生产环节绩效有所提升, 但在此过程中, 在批发价和需求量双重提高的作用下, 供应商反而获利更高。供应商“搭便车”的机会主义行为在一定程度上会造成制造商不公平感知, 甚至可能造成不可调和的利益冲突, 从而影响供应链长期发展的稳健性。

(二) 基于成本分担的供应商前向整合契约模型(C)

为进一步激励制造商和回收商分别提高创新程度和服务水平, 提升供应链系统整体绩效, 针对回收商的“利己损他”行为和供应商“搭便车”的机会主义行为, 本节在模型(Y)的基础上设计基于成本分担的供应商前向整合契约对决策模型进行优化。

假设供应商分担 λ 比例的制造商创新成本和 ρ 比例的回收商服务成本, 此时供应链成员利润为:

$$\begin{cases} \pi_m = m(\xi - \alpha w - \alpha c_m - \alpha m + \alpha\phi e_m) - \frac{1}{2}(1 - \lambda)\eta e_m^2 \\ \pi_s = (w - c_s)(\xi - \alpha w - \alpha c_m - \alpha m + \alpha\phi e_m) - \frac{1}{2}\lambda\eta e_m^2 + (c_s - c_{s0} - p_s - F)(\beta p_c + s) - \frac{1}{2}\rho k s^2 \\ \pi_c = (p_s - p_c)(\beta p_c + s) - \frac{1}{2}(1 - \rho)k s^2 \end{cases} \quad (4)$$

考虑到回收商不利不公平厌恶($\theta_c > 0$)和“利己损他”行为, 在供应商成本分担机制的基础上, 进一步以约定的回收转移价格 $p_s^Y = \frac{(c_s - c_{s0} - F)(1 + 3\theta_c)}{2(1 + 2\theta_c)}$ 为契约条件将供应商和回收商整合, 整合后供应商作为废旧产品回收价格和回收服务水平的决策主体, 回收商按照供应商制订的回收价格和服务水平进行回收, 最终以约定的回收转移价进行回收结算。整合后, 供应商和回收商作为一个整体用下标 SC 表示, 此时供应链成员的利润为:

$$\begin{cases} \pi_m = m(\xi - \alpha w - \alpha c_m - \alpha m + \alpha\phi e_m) - \frac{1}{2}(1 - \lambda)\eta e_m^2 \\ \pi_{sc} = (w - c_s)(\xi - \alpha w - \alpha c_m - \alpha m + \alpha\phi e_m) - \frac{1}{2}\lambda\eta e_m^2 + (c_s - c_{s0} - F - p_c)(\beta p_c + s) - \frac{1}{2}k s^2 \end{cases} \quad (5)$$

命题 3: 当 $4\eta(1 - \lambda) > \alpha\phi^2$ 时, 基于成本分担的供应商前向整合契约模型决策均衡结果为:

$$\begin{aligned} (1) \text{ 决策均衡解: } w^c &= \frac{\eta(1 - \lambda)(\xi - \alpha c_m) + \alpha c_s[3\eta(1 - \lambda) - \alpha\phi^2]}{\alpha[4\eta(1 - \lambda) - \alpha\phi^2]}, m^c = \frac{2\eta(1 - \lambda)(\xi - \alpha c_s - \alpha c_m)}{\alpha[4\eta(1 - \lambda) - \alpha\phi^2]}, e_m^c = \\ &= \frac{\phi(\xi - \alpha c_s - \alpha c_m)}{4\eta(1 - \lambda) - \alpha\phi^2}, p_c^c = \frac{\xi[3\eta(1 - \lambda) - \alpha\phi^2] + \eta(1 - \lambda)(\alpha c_s + \alpha c_m)}{\alpha[4\eta(1 - \lambda) - \alpha\phi^2]}, p_s^c = \frac{(c_s - c_{s0} - F)(1 + 3\theta_c)}{2(1 + 2\theta_c)}, s^c = \frac{\beta(c_s - c_{s0} - F)}{2k\beta - 1}, \\ p_c^c &= \frac{(k\beta - 1)(c_s - c_{s0} - F)}{2k\beta - 1} \end{aligned}$$

$$(2) \text{ 需求量和回收量为: } q^C = \frac{\eta(1-\lambda)(\xi - \alpha c_s - \alpha c_m)}{4\eta(1-\lambda) - \alpha\phi^2}, d^C = \frac{k\beta^2(c_s - c_{s0} - F)}{2k\beta - 1}.$$

$$(3) \text{ 回收商、制造商和供应商的利润分别为: } \pi_c^C = \frac{k\beta^2(c_s - c_{s0} - F)^2[\theta_c(2k\beta - 1) + \rho(1 + 2\theta_c)]}{2(2k\beta - 1)^2(1 + 2\theta_c)}, \pi_m^C = \frac{\eta(1-\lambda)(\xi - \alpha c_s - \alpha c_m)^2}{2\alpha[4\eta(1-\lambda) - \alpha\phi^2]}, \pi_s^C = \frac{\eta(\xi - \alpha c_s - \alpha c_m)^2[2\eta(1-\lambda)^2 - \alpha\lambda\phi^2]}{2\alpha[4\eta(1-\lambda) - \alpha\phi^2]^2} + \frac{k\beta^2(c_s - c_{s0} - F)^2[(2k\beta - 1)(1 + \theta_c) - \rho(1 + 2\theta_c)]}{2(2k\beta - 1)^2(1 + 2\theta_c)}.$$

推论 3: 基于成本分担的供应商前向整合契约下,成本分担系数对供应链决策均衡结果的影响如下:

$$(1) \frac{\partial p_s^C}{\partial \rho} = \frac{\partial p_c^C}{\partial \rho} = \frac{\partial s^C}{\partial \rho} = \frac{\partial d^C}{\partial \rho} = 0, \frac{\partial \pi_c^C}{\partial \rho} > 0, \frac{\partial \pi_s^C}{\partial \rho} < 0. (2) \frac{\partial e_m^C}{\partial \lambda} > 0, \frac{\partial m^C}{\partial \lambda} > 0, \frac{\partial w^C}{\partial \lambda} > 0, \frac{\partial p^C}{\partial \lambda} < 0, \frac{\partial q^C}{\partial \lambda} > 0; \frac{\partial \pi_m^C}{\partial \lambda} > 0, \text{ 并且当 } \lambda < \frac{\alpha\phi^2}{8\eta} \text{ 时, } \frac{\partial \pi_s^C}{\partial \lambda} > 0, \text{ 否则 } \frac{\partial \pi_s^C}{\partial \lambda} \leq 0.$$

结论 3: 对比三种博弈模型可得如下关系:(1) $p_s^C = p_s^Y > p_s^N, s^C > s^Y, d^C > d^Y > d^N, p_c^C > p_c^Y, p_c^N > p_c^Y$, 当 $2k\beta - 3 > 0$ 时, $p_c^C > p_c^N$, 否则 $p_c^C \leq p_c^N$ 。(2) $w^C > w^Y > w^N, p^C < p^Y < p^N, e_m^C > e_m^Y, q^C > q^Y > q^N, m^C > m^Y > m^N$ 。(3) $\pi_c^C + \pi_s^{C(2)} > \pi_c^Y + \pi_s^{Y(2)} > \pi_c^N + \pi_s^{N(2)}$, 当 $\lambda < \frac{2(4\eta - \alpha\phi^2)}{16\eta - 3\alpha\phi^2}$ 时, $\pi_m^C + \pi_s^{C(1)} > \pi_m^Y + \pi_s^{Y(1)} > \pi_m^N + \pi_s^{N(1)}$ 。

推论 3、结论 3 表明,在回收环节,当供应商与回收商整合后,除回收商利润与服务成本分担比例正相关、供应商利润与服务成本分担比例负相关外,其他回收环节决策变量均不受服务成本分担比例的影响,而且整体作为决策主体,避免了回收商和供应商分散决策时的双重边际效应,使得增值服务水平和回收量提高,从而致使回收环节整体效益显著提升。在生产环节,随着创新成本分担比例的提高,制造商利润会稳步增加,而供应商利润呈现出先增后减的趋势。当创新成本分担比例低于一定阈值时,尽管供应商为阻止利润缩水会相应地提高批发价,但是源于创新成本的分担,促使制造商有更强的动力提高产品创新程度、降低零售价,进而刺激消费需求的释放,从而对生产环节总利润的提升产生正效应。

结论 4: 基于成本分担的供应商前向整合契约下,当 $\lambda > \frac{\alpha\phi^2}{8\eta}$ 时,有 $\Delta\pi_m^{CN} > \Delta\pi_s^{CN}$ 。其中, $\Delta\pi_m^{CN} = \pi_m^C - \pi_m^N$, $\Delta\pi_s^{CN} = \pi_s^{C(1)} - \pi_s^{N(1)}$, $\pi_s^{C(1)} = \frac{\eta^2(\xi - \alpha c_s - \alpha c_m)^2[2\eta(1-\lambda)^2 - \alpha\lambda\phi^2]}{2\alpha[4\eta(1-\lambda) - \alpha\phi^2]^2}$ 。

由结论 4 知,存在创新成本分担比例阈值,当供应商分担的创新成本比例低于该阈值,对其有利,反之,对制造商更有利。因而从消除制造商不公平感知的角度而言,创新成本分担比例越大,对供应商“搭便车”的约束效果就越显著,从而越有利于消除制造商的不公平感知。

结论 5: 在契约参数满足如下关系时,基于成本分担的供应商前向整合契约可实现供应链 Pareto 改进:

$$(1) \text{ 当 } \theta_c > \frac{2k\beta - 5}{8} \text{ 时, 存在 } \rho \in (\underline{\rho}, \bar{\rho}), \text{ 使得 } \pi_c^C > \pi_c^Y > \pi_c^N, \pi_s^{C(2)} > \pi_s^{Y(2)}, \pi_s^{C(2)} > \pi_s^{Y(2)}. (2) \text{ 若 } 8\eta - 3\alpha\phi^2 \leq 0, \text{ 则当 } \lambda \in \left(0, \frac{4\eta - \alpha\phi^2}{4\eta}\right) \text{ 时, 有 } \pi_m^C > \pi_m^Y > \pi_m^N, \pi_s^{C(1)} > \pi_s^{N(1)}, \pi_s^{C(1)} > \pi_s^{Y(1)}; \text{ 若 } 8\eta - 3\alpha\phi^2 > 0, \text{ 则当 } \lambda \in (0, \lambda_1) \text{ 时, 有 } \pi_m^C > \pi_m^Y > \pi_m^N, \pi_s^{C(1)} > \pi_s^{N(1)}, \pi_s^{C(1)} > \pi_s^{Y(1)}. \text{ 其中 } \underline{\rho} = \frac{2k\beta - 1}{4(1 + 2\theta_c)}, \bar{\rho} = \min\left(1, \frac{(2k\beta - 1)(2k\beta + 1 + 2\theta_c)}{4k\beta(1 + 2\theta_c)}\right), \lambda_1 = \frac{\alpha\phi^2(4\eta - \alpha\phi^2)}{2\eta(8\eta - \alpha\phi^2)}.$$

由结论 5 可知,基于成本分担的前向整合契约下,当公平关切度和契约参数不满足上述条件时,存在供应链成员利润低于无契约时的情形,此时供应链成员共同接受该契约的动力不足。当回收商公平

关切度、供应商成本分担比例满足上述条件时,供应链各方的利润均高于无契约下的利润,此时供应链成员不仅有动力接受该契约,还可以实现供应链 Pareto 改进,从而提升整体绩效,实现互利共赢。

因此,结论 4、结论 5 表明,基于成本分担的供应商前向整合契约不仅能调和供应链成员间的利益冲突,避免回收商“利己损他”行为,约束供应商“搭便车”的机会主义行为,还能进一步优化决策模型,改善供应链的运作效率,提升供应链整体绩效。

五、算例分析

本节以世纪朝阳回收中心为例进行数值算例分析。本文结合对世纪朝阳回收中心的实际调研,并参考相关文献研究中参数赋值的思路^[2,17],力求使结论更一般化,对具体参数赋值为: $\xi = 600, \alpha = 12, \beta = 8, c_m = 15, c_s = 20, c_{s0} = 9, F = 1, \eta = 10, k = 0.5$ 。需要说明的是,在不影响数据所呈现出的变化趋势的情况下,表 1 和表 2 只按步长列出了部分数据。

(一) 公平关切度与创新成功率敏感性分析

1. 公平关切度对供应链决策均衡结果的敏感性分析

由于公平关切度在模型(Y)、模型(C)中对供应链决策的影响机理相同,下面以模型(Y)为例,对公平关切度的敏感性进行分析。

表 1 θ_c 对供应链回收环节决策均衡结果的影响

θ_c	p_s^Y	p_c^Y	s^Y	d^Y	π_c^Y	$\pi_s^{Y(2)}$	$\pi_c^Y - \pi_c^N$	$\pi_s^{Y(2)} - \pi_s^{N(2)}$	$(\pi_c^Y + \pi_s^{Y(2)}) - (\pi_c^N + \pi_s^{N(2)})$
0.0	5.00	2.14	5.71	22.86	57.14	114.29	7.14	14.29	21.43
0.1	5.42	2.14	5.71	22.86	66.67	104.76	16.67	4.76	21.43
0.3	5.94	2.14	5.71	22.86	78.57	92.86	28.57	-7.14	21.43
0.6	6.36	2.14	5.71	22.86	88.31	83.12	38.31	-16.88	21.43

从表 1 可以看出,随着回收商公平关切度的提高,回收价、增值服务水平、回收量均不受影响,回收转移价和回收商利润明显提高,而供应商的利润逐渐降低,甚至出现低于无公平关切下的利润,说明回收商公平关切是一种“利己损他”行为,但回收环节总利润与无公平关切时回收环节总利润的差额始终保持不变,表明回收商公平关切也是回收系统内部利润分配的一种手段,而且此差额为回收商提供增值服务所产生的利润。

2. 公平关切度对服务成本分担比例的敏感性分析

从图 1 可以观察到:第一,在成本分担的供应商前向整合契约下,供应商服务成本分担比例 ρ 随着回收商公平关切度 θ_c 的提高而降低,这是因为回收商越公平关切,供应商给出的回收转移价相对越高,但供应商可让渡的利润空间始终是有限度的,所以 ρ 会随着 θ_c 的提高而降低并逐渐趋于平稳。第二,当回收商公平关切度小于 0.38 时,使供应链得到 Pareto 改进的服务成本分担比例 ρ 不存在,当 $\theta_c \in (0.38, 2.61]$ 时,随着 θ_c 的增大, ρ 的区间也逐渐增大,在 $\theta_c = 2.61$ 时, $\rho \in (0.28, 1)$,此时 ρ 的区间达到最大,当 $\theta_c > 2.61$ 时,随着 θ_c 的增大, ρ 的区间逐渐趋于平稳。这意味着,随着回收商公平关切度的提高,供应链回收环节会经历一个从不能实现改进到较易实现改进的过程。

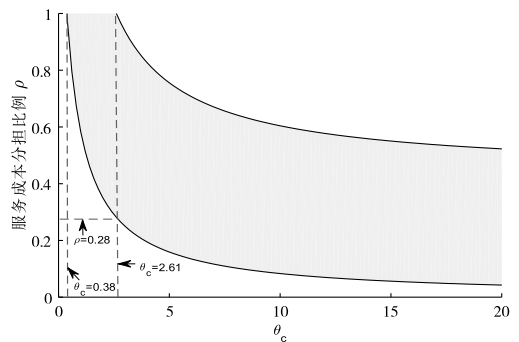


图 1 θ_c 对服务成本分担比例 ρ 的影响

3. 创新成功率对供应链决策均衡结果的敏感性分析

同样,由于创新成功率在模型(Y)、模型(C)中对供应链决策的影响机理相同,下面以模型(Y)为例,对创新成功率的敏感性进行分析。

观察表 2,随着创新成功率的提高,虽然批发价小幅提高,但产品品质的提升和零售价小幅降低的双重作用促进消费需求明显增长,因而“水涨船高”,供应链系统总利润显著增长,但创新给制造商带来的收益始终低于供应商,而且创新成功率越高,创新收益上的差距就越明显。

表 2 ϕ 对供应链生产环节决策均衡结果的影响

ϕ	w^Y	p^Y	m^Y	e_m^Y	q^Y	π_m^Y	$\pi_s^{Y(1)}$	$\pi_m^Y - \pi_m^N$	$\pi_s^{Y(1)} - \pi_s^{N(1)}$	$(\pi_m^Y + \pi_s^{Y(1)}) - (\pi_m^N + \pi_s^{N(1)})$
0.0	23.75	46.25	7.50	0.00	45.00	337.50	168.75	0.00	0.00	0.00
0.5	24.05	45.95	8.11	2.43	48.65	364.86	197.22	27.36	28.47	55.83
0.8	24.64	45.36	9.28	4.46	55.69	417.70	258.48	80.20	89.73	169.93
1.0	25.36	44.64	10.71	6.43	64.29	482.14	344.39	144.64	175.64	320.28

(二) 成本分担比例对供应链利润的影响

1. 服务成本分担比例对回收环节利润的影响

取 $\theta_c = 3$ 时,经计算得 $\rho = 0.25, \bar{\rho} = 0.94$,服务成本分担比例对回收环节利润的影响如图 2 所示。观察图 2 发现,随着服务成本分担比例的提高,回收商的利润稳步提高,并且在 $\rho = 0.25$ 处,与公平关切下的利润相等,而供应商回收环节的利润逐渐降低,但在 $\rho \in (0, 0.94)$ 时,却明显高于无契约的情形,表明成本分担比例在该区间上,供应商前向整合契约能够避免回收商“利己损他”行为。在 $\rho = 0.94$ 处,供应商回收环节利润与无公平关切下的利润相等。因此,在 $\rho \in (0.25, 0.94)$ 时,可实现供应链回收环节 Pareto 改进。

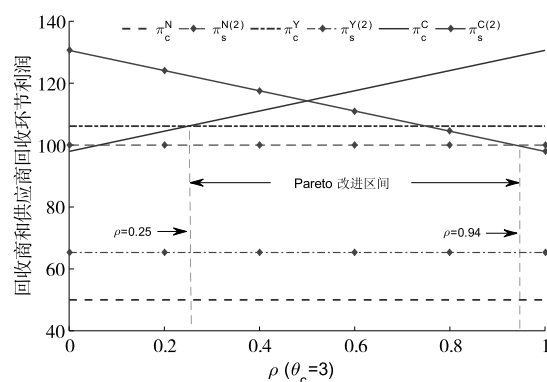


图 2 当 $\theta_c = 3$ 时, ρ 对回收环节利润的影响

2. 创新成本分担比例对生产环节利润的影响

在取 $\phi = 1$ 时,由结论 3、结论 4 和结论 5 可得: $\frac{2(4\eta - \alpha\phi^2)}{16\eta - 3\alpha\phi^2} = 0.45, \frac{\alpha\phi^2}{8\eta} = 0.15, \lambda_1 \approx 0.25$ 。创新成本分担比例 λ 对生产环节利润的影响如图 3 至图 6 所示。

从图 3 可见,制造商利润与供应商创新成本分担比例正相关,而且显著高于无契约的情形。观察图 4 可知,随着创新成本分担比例的提高,供应商生产环节的利润先增后减,在 $\lambda = 0.15$ 处,创新边际成本与边际利润相等,此时利润达到最大值,在 $\lambda = 0.25$ 时,供应商因批发价和需求提高带来的利润上的增量与其分担的创新成本相等,因而其利润与模型(Y)相等,随着创新成本分担比例的进一步提高,其分担的创新成本远高于批发价和需求提高带来的利润,因而其利润持续走低。因此,在 $\lambda \in (0, 0.25)$ 时,供应商因分担创新成本导致批发价和需求量的提高带来的收益增加量高于其分担的创新成本,此时可实现供应链生产环节 Pareto 改进。

从图 5 可知,随着创新成本分担比例的提高,模型(C)生产环节总利润呈现出先增后减的趋势,而且在创新成本分担比例小于 0.45 时,模型(C)生产环节总利润最高,模型(Y)次之,模型(N)最低,而创新成本分担比例一旦高于 0.45,模型(C)生产环节总利润将低于模型(Y)生产环节总利润。因而,对于供应链系统而言,创新成本分担比例不宜过高。

观察图 6 发现,在创新成本分担比例低于 0.15 时,尽管双方的利润增量均随创新成本分担比例的提高而提高,但供应商的利润增量更高,意味着此情形对供应商更有利;相反,创新成本分担比例高于 0.15 对制造商更有利,并且此情形下,随着创新成本分担比例的提高,供应商的利润增量逐渐降低,甚至低于模型(Y)的情形,说明创新成本分担比例越高,对供应商“搭便车”的约束效果就越显著。

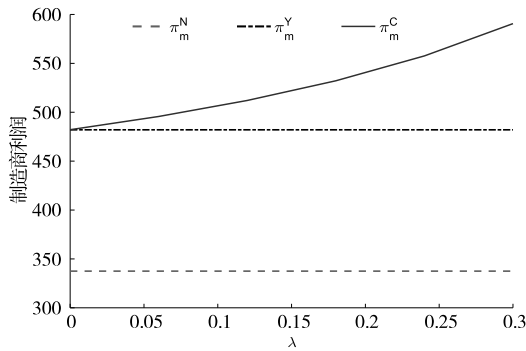


图3 λ对制造商利润的影响

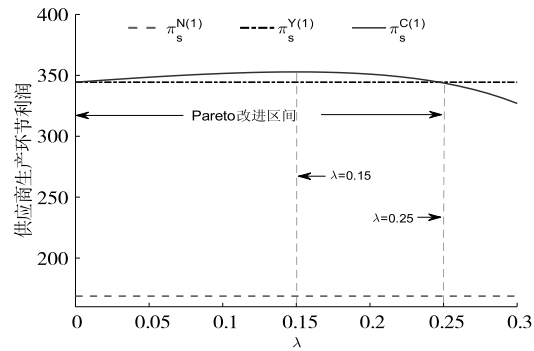


图4 λ对供应商生产环节利润的影响

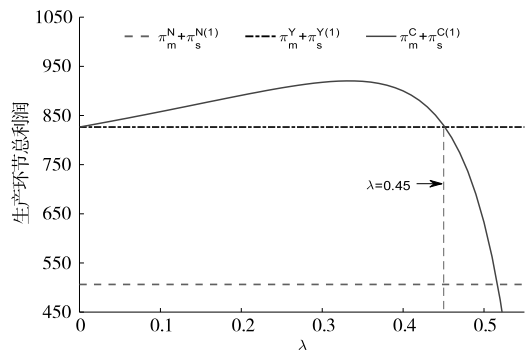


图5 λ对生产环节总利润的影响

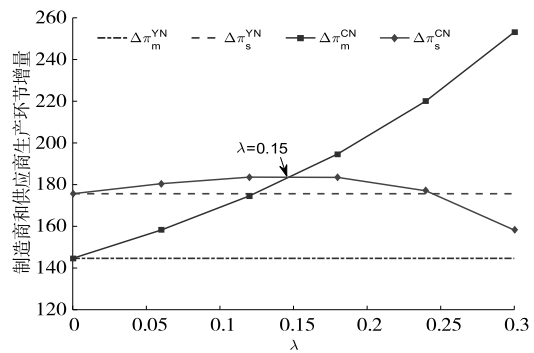


图6 λ对制造商、供应商利润增量的影响

六、结论性评述

本文考虑制造商创新投入问题和回收商因提供增值服务而产生的公平关切问题,分别构建公平关切和创新投入与否的供应链决策模型,并针对回收商不利不公平厌恶设计基于成本分担的供应商前向整合契约,探讨了关键参数对供应链决策的影响,最后利用数值实验进一步验证和扩展研究结论。研究表明制造商创新投入和回收商提供增值服务时,供应链整体绩效明显提升,但供应商存在双重“搭便车”的机会主义行为。回收商公平关切会促使供应商给出更高的回收转移价,从而导致其利润增加,供应商利润降低,因此回收商公平关切是回收系统内部利润分配的一种手段,也是一种“利己损他”行为。随着创新成功率提高,供应链系统总利润会显著增长,但供应商“搭便车”的机会主义行为会削弱制造商投资的积极性,甚至造成不可调和的利益冲突。以公平关切下的回收转移价为契约条件,基于成本分担的供应商前向整合契约有利于制造商创新度、市场需求量、增值服务水平和回收量的提高,而且当公平关切程度、成本分担比例满足一定条件时,该契约不仅能避免回收商“利己损他”行为,约束供应商“搭便车”的机会主义行为,还能实现供应链 Pareto 改进。

参考文献:

- [1] Islam M T, Huda N. Assessing the recycling potential of “unregulated” e-waste in Australia[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2020, 152:104526.
- [2] Saha S, Sarmah S P, Moon I. Dual channel closed-loop supply chain coordination with a reward-driven remanufacturing policy[J]. International Journal of Production Research, 2016, 54(5):1503-1517.
- [3] 王喜刚. 逆向供应链中电子废弃产回收定价和补贴策略研究[J]. 中国管理科学, 2016 (8):107-115.
- [4] 尚春燕, 关志民, 米力阳. 政府干预下考虑互惠偏好的闭环供应决策分析[J]. 工业工程与管理, 2021 (1):111-120.
- [5] Feng L P, Govindan K, Li C F. Strategic planning: Design and coordination for dual-recycling channel reverse supply chain consider-

- ing consumer behavior[J]. *European Journal of Operational Research*, 2017,260(2):601-612.
- [6] Wang W B, Zhou S, Zhang M, et al. A closed-loop supply chain with competitive dual collection channel under asymmetric information and reward-penalty mechanism[J]. *Sustainability*, 2018,10(7):1-31.
- [7] 卞文良,潘岳,王文宾,等. 维修中心参与回收时闭环供应链的定价决策及回收模式选择[J]. *运筹与管理*,2021(3):76-82.
- [8] Ghosh D, Shan J. A comparative analysis of greening policies across supply chain structures[J]. *International Journal of Production Economics*, 2012,135(2):568-583.
- [9] Li B, Zhu M, Jiang Y, et al. Pricing policies of a competitive dual-channel green supply chain[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2016,112:2029-2042.
- [10] Liao Y, Marsillac E. External knowledge acquisition and innovation: The role of supply chain network-oriented flexibility and organizational awareness[J]. *International Journal of Production Research*, 2015,53(18):5437-5455.
- [11] 杨天剑,田建改. 不同渠道权力结构下供应链定价及绿色创新策略[J]. *软科学*,2019(12):127-132.
- [12] Fiala P. Profit allocation games in supply chains[J]. *Central European Journal of Operations Research*, 2016,24(2):267-281.
- [13] 单而芳,吴美慧,吕文蓉,等. 基于位置值的四级供应链创新联盟及收益分配[J]. *工业工程与管理*,2021(1):36-43.
- [14] Yang A Z, Chen A H, Du B L, et al. How does alliance-based government-university-industry foster cleantech innovation in a green innovation ecosystem? [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020,27(10):1-17.
- [15] 姜明君,陈东彦. 公平偏好下绿色供应链收益分享与绿色创新投入[J]. *控制与决策*,2020(6):1463-1468.
- [16] 张涛,张玉豪. 零售商公平关切对双回收渠道闭环供应链决策的影响[J]. *同济大学学报(自然科学版)*,2021(10):1494-1504.
- [17] 曹晓刚,黄美,闻卉. 考虑公平关切的闭环供应链差别定价决策及协调策略[J]. *系统工程理论与实践*,2019(9):2300-2314.
- [18] 王玉燕,吕灵雪,苏梅,等. 公平关切下闭环供应链的决策与创新投入[J]. *系统管理学报*,2021(2):332-343.
- [19] 朱晓东,李薇. 双边网络环境下考虑消费者行为的两期供应链回收定价模型研究[J]. *中国管理科学*,2021(5):97-107.
- [20] Wang Y, Yu Z. Research on advertising and pricing in e-supply chain under different dominant modes[J]. *Journal of Systems Science and Information*, 2018,6(1):58-68.
- [21] Fehr E, Schmidt K M. A theory of fairness, competition, and cooperation[J]. *The Quarterly Journal of Economics*,1999, 3(114):817-868.

[责任编辑:高 婷]

Research on Decision Optimization of Closed-loop Supply Chain under Fairness Concern and Innovation Investment

MI Liyang^{1,2a}, SHANG Chunyan^{2b}

(1. School of Business Administration, Northeastern University, Shenyang 110169, China;

2. School of Science and Chemical Engineering, Ningxia Institute of Science and Technology, Shizuishan 753000, China)

Abstract: Considering the fairness concern of recyclers and the innovation investment of manufacturers, the closed-loop supply chain decision-making models of fairness concern and innovation investment are constructed respectively, and the suppliers' forward integration contract based on cost sharing is designed for the disadvantage and unfairness of recycler. The influences of fairness concern, innovation success rate and cost sharing ratio on supply chain decision-making are discussed. The results show that the recyclers' concern for fairness is a means of profit distribution within the recycling system, and it is also an act of "harming others for one's own benefit". The improvement of the success rate of innovation is conducive to the profit growth of the supply chain system, but the "free-riding" behavior of suppliers is not conducive to the innovation of manufacturer and the long-term stability of the supply chain. When the degree of fairness concern and the proportion of cost sharing meet certain conditions, the forward integration contract of suppliers based on cost sharing can not only avoid the "harming others for one's own benefit" behavior of the recyclers, but also restrain the suppliers' opportunistic "free-riding" behavior, and further optimize the decision-making model to achieve Pareto improvement of supply chain.

Key Words: fairness concern; closed-loop supply chain; innovation investment; cost sharing; waste recycling; supply chain innovation; extended producer responsibility