

渠道权力结构和回收方式对闭环供应链的影响

张维月¹, 刘晨光¹, 李芳², 李琳¹

(1. 西北工业大学管理学院, 陕西 西安 710072;

2. 深圳迈瑞生物医疗电子股份有限公司, 广东 深圳 518000)

摘要: 针对制造商和零售商组成的闭环供应链, 根据制造商回收和零售商回收两种回收方式, 以及制造商领导和零售商领导两种渠道权力结构, 构建了四种决策模型, 分析了不同回收方式和不同渠道权力结构对闭环供应链经济和环境绩效的影响. 以正向供应链决策模型为基准, 探讨了企业实施闭环供应链的条件和回收方式的选择问题. 研究发现, 与领导者企业回收废旧品相比, 跟随者企业回收时的回收率、市场需求、供应链成员利润和系统利润更高; 实施闭环供应链提高了市场需求、成员利润和系统利润; 再制造品生产、使用和废旧品回收环节的环境影响之和很小, 由跟随者企业回收废旧品, 能够同时实现最优经济和环境绩效.

关键词: 可持续运营管理; 闭环供应链; 回收方式; 渠道权力结构; Stackelberg 博弈

中图分类号: F205; F224 文献标识码: A 文章编号: 1000-5781(2021)04-0495-14

doi: 10.13383/j.cnki.jse.2021.04.005

Impacts of channel power structures and collection modes on the closed-loop supply chain

Zhang Weiyue¹, Liu Chenguang¹, Li Fang², Li Lin¹

(1. School of Management, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;

2. Shenzhen Mindray Bio-Medical Electronics Co., Ltd., Shenzhen 518000, China)

Abstract: Considering two collection modes, namely, manufacturer collecting and retailer collecting, as well as two channel power structures, namely, manufacturer Stackelberg and retailer Stackelberg, four decision models are constructed to investigate the impact of collection modes and channel power structures on the economic and environmental performance of a closed-loop supply chain with a manufacturer and a retailer. The conditions for implementing the closed-loop supply chain and the optimal collection mode are obtained through comparison with the forward supply chain decision model. The results show that the collection rates, market demands, channel players' and the system's profits of the closed-loop supply chain are all better under the follower collecting mode compared with the leader collecting mode. The market demands, channel players' and the system's profits of the closed-loop supply chain are superior to those in the forward supply chain. For products with a small overall environmental impact in the remanufacturing, usage and disposal phases, the follower collecting mode can simultaneously realize the optimal economic and environmental performance.

Key words: sustainable operations management; closed-loop supply chain; collection modes; channel power structures; Stackelberg game

1 引言

随着资源短缺和环境恶化的不断加剧,闭环供应链作为通过废旧品回收再利用创造经济价值和改善环境的管理模式^[1-6],受到国内外知名企业如佳能、惠普、施乐、联想和格力等的青睐。比如,施乐通过对零部件回收利用,5年时间里共计节约了2千万美元的原材料成本和40%~65%的制造成本^[7],户外服装公司Patagonia通过对废旧服装再加工,降低了71%的温室气体排放^[2]。然而,闭环供应链涉及产品回收、分类、清洗等环节,投资成本高昂^[8],企业实施闭环供应链获利与否与回收数量密切相关,而回收方式是决定回收数量的关键^[9]。另一方面,供应链渠道权力结构对回收决策乃至整个闭环供应链绩效也有很大影响^[1]。因此,本文探讨不同渠道权力结构和不同回收方式对闭环供应链绩效的影响。此外,区别于以往文献只关注企业的经济绩效,本文还分析了实施闭环供应链后环境绩效的变化。

学术文献中关于回收方式选择的研究已经非常成熟,目前常见的回收方式包括制造商回收,零售商回收和第三方企业回收^[9-11],如施乐、惠普、佳能等是制造商回收的代表,手机、一次性相机等消费品制造商通常利用零售商回收废旧品,而汽车行业一般通过第三方回收商回收废旧品。Savaskan等^[10]研究了由制造商和零售商组成的双边垄断型供应链,在三种回收方式下的批发价格、零售价格和回收率决策,并分析了回收方式对制造商、零售商以及供应链系统利润的影响。随后Savaskan等^[11]分析了零售商竞争对闭环供应链回收方式选择和定价决策的影响。卢荣花等^[12]考虑了需求不确定性和零售商存在竞争时的闭环供应链回收方式选择问题。Chuang等^[13]研究了产品需求随机时,制造商在三种回收方式下的最优生产决策,并分析了回收成本结构和回收法规对回收方式选择的影响。通过引入消费者网络回收渠道偏好,李春发等^[14]比较了传统回收、网络回收和第三方网络回收平台构成的四种不同的WEEE回收渠道模式。李晓静等^[15]以制造商和零售商组成的闭环供应链的集中决策模型为基准,研究回收方式对供应链成员利润的影响,并以回收率和供应链成员利润共赢为标准探讨最优回收方式。考虑回收市场和产品市场存在竞争,Wang等^[16]分析了由制造商、再制造商和零售商组成的闭环供应链的定价决策和制造商回收方式选择问题。He等^[17]针对制造商和零售商组成的闭环供应链,研究了消费者对回收方式的便捷性认知对回收率和回收方式选择的影响,并比较了集中决策和分散决策的供应链绩效,最后通过契约和授权机制进行协调。以上这些文献从不同市场环境探讨了回收方式的选择问题,但都是在制造商为领导者的前提下进行分析,没有讨论不同渠道权力结构对回收方式选择产生的影响。另外,这些文献大多根据经济绩效选择回收方式,较少考虑环境绩效。

目前学术文献关于渠道权力结构的研究主要围绕正向供应链的决策问题展开^[18-21],很少分析其对闭环供应链绩效和回收决策的影响。Choi等^[1]首次探讨了供应链渠道权力结构(制造商、零售商和回收商分别作为供应链领导者)对闭环供应链定价策略和回收绩效的影响。Wang等^[22]针对制造商和回收商组成的闭环供应链,分析了政府奖惩机制对制造商领导和零售商领导的闭环供应链回收绩效的影响,研究显示,与集中决策和制造商领导相比,回收商领导下的回收率更高。考虑依赖价格和回收努力、销售努力的市场需求,Gao等^[23]研究了渠道权力结构对闭环供应链最优决策和绩效的影响,以识别经济最优的渠道权力结构。Zheng等^[24]在双销售渠道背景下,针对制造商、零售商和回收商组成的闭环供应链,探讨了销售渠道竞争和渠道权力结构对闭环供应链定价、回收决策和供应链绩效的影响。易余胤^[25]分析了供应链渠道权力结构(制造商领导、零售商领导以及无领导者)和零售商竞争对回收率、零售价、供应链成员利润和系统利润的影响,并从环保、消费者利益和行业利益探讨了最优的渠道权力结构。王婷婷等^[26]探讨了纳什博弈,生产商主导,零售商主导和合作博弈四种模式下的零售商回收决策,结果表明,零售商主导能够达到供应链共同利润最大化。以上文献均是在单一回收方式下讨论不同渠道权力结构对闭环供应链绩效产生的影响,没有分析不同回收方式和不同渠道权力结构的组合对企业实施闭环供应链的影响。

闭环供应链作为企业改善环境绩效的重要手段^[8,17,27],探讨企业实施闭环供应链对环境绩效的影响十分关键。Giovanni等^[9]针对由制造商、零售商和回收商组成的闭环供应链,从经济、环境和社会三个维度探

讨了回收方式的选择问题. Miao 等^[28]构建了集中决策回收, 制造商回收和零售商回收三个决策模型, 综合考虑经济和环境绩效, 得出了三个模型下的最优回收策略 (不回收, 部分回收和全部回收). 卢荣花等^[29]分析了零售商竞争和投资绿色活动项目情况下, 两周期闭环供应链的回收方式选择问题, 从经济、环境和社会效益三方面分析最优回收方式选择以及零售商竞争对回收方式选择的影响. Xiong 等^[5]分析了制造商再制造和供应商再制造的绩效, 并从制造商、供应商、消费者等利益相关者以及环境角度选择最优的再制造实施企业. Zhang 等^[30]分析了消费者购买行为和再制造效率对废旧品以旧换新模式下企业的经济和环境绩效的影响, 研究表明, 再制造效率很高不一定能改善企业经济效益, 当消费者具有高度前瞻性时, 以旧换新模式会造成企业经济和环境绩效的冲突和矛盾, 对环境和社会福利都有很大的伤害. Yenipazarli^[2]建立了政府和制造商的斯塔克伯格博弈模型, 分析了碳排放税对新产品和再制品生产决策和定价决策的影响, 以及制造商进行再制造的碳税范围, 并从社会福利最优的角度得出碳排放税额度. 以上文献对闭环供应链环境绩效的评价主要围绕回收或生产等单一环节, 通过逆向回收绩效即回收率高低或者生产环节的碳排放量衡量, 很少从产品全生命周期的角度分析闭环供应链的环境绩效. 此外, 以上研究默认制造商为领导者, 没有考虑不同渠道权力结构对闭环供应链环境绩效产生的影响.

基于以上文献, 本文针对单一制造商和单一零售商组成的闭环供应链, 考虑制造商回收和零售商回收两种回收方式, 以及制造商为领导者和零售商为领导者两种渠道权力结构, 构建了闭环供应链四种模式下的决策模型, 分析不同回收方式和不同渠道权力结构对闭环供应链经济和环境绩效的影响. 并以正向供应链决策模型为基准, 考察企业实施闭环供应链的条件和不同渠道权力结构下的最优回收方式. 具体探讨以下问题: i) 四种闭环供应链决策模型的最优决策是什么? 不同回收方式和不同渠道权力结构对企业生产和回收决策有什么影响? ii) 与正向供应链相比, 闭环供应链对产品定价、市场需求、供应链成员利润、系统利润和环境绩效会产生什么影响? iii) 实施闭环供应链的条件是什么? 不同渠道权力结构下的最优回收方式如何? 本文从经济和环境两个维度探讨了企业实施闭环供应链的条件以及不同渠道权力结构下的最优回收方式, 研究成果丰富了闭环供应链理论体系, 也为企业实施闭环供应链提供了一定的决策方法支持.

2 供应链决策模型

2.1 问题描述

考虑单个制造商和单个零售商组成的两阶段单周期供应链, 制造商按照零售商订单生产产品, 批发价格为 w , 产品通过零售商以价格 p 销售给消费者, 经消费者使用成为报废品. 在正向供应链中, 制造商不回收废旧品, 而是根据生产者责任延伸制度, 委托专门的回收单位回收并处理废旧品, 单位废旧品处理成本为 c_d , 由制造商支付. 在闭环供应链中, 废旧品由制造商或零售商进行回收, 零售商回收时, 制造商以价格 κ 从零售商处回购废旧品, 假设废旧品是同质的且残值较低, 不具有二级交易市场, 因此, 设置 κ 为外生变量^[31]. 废旧品回收后由制造商进行再制造, 一单位废旧品可生产一单位再制品, 单位新产品和单位再制品的生产成本分别为 c_m 和 c_r , 满足 $c_r < c_m$ ^[10], 即再制品具有成本优势, 令 $\Delta (\Delta = c_m - c_r)$ 表示单位生产成本节约, 满足 $\Delta + c_d \geq \kappa$, 这一条件保证制造商从零售商处回购废旧品进行再制造是有利可图的.

制造商和零售商通过投资物流服务、员工培训等来提高回收率^[13], 根据 Savaskan 等^[10]的研究, 回收投资 I 是关于回收率 τ 的凸增函数, 表示为 $I = \frac{1}{2}\varepsilon\tau^2$, 其中, ε 为转换系数, 体现了投资回报递减规律. 本文考虑的是一个稳态过程, 即产品在中数量是固定的, 则闭环供应链下产品的平均成本为 $c = (1 - \tau)c_m + \tau c_r = c_m - (c_m - c_r)\tau = c_m - \Delta\tau$, 从这一成本函数可以看出回收率越高, 平均生产成本越低^[10]. 假设再制品和产品质量无差异, 以同一价格销售, 考虑市场需求是关于产品价格的线性函数, 即 $q = \alpha - \beta p$, 其中 $\alpha > 0$, $\beta > 0$, 分别表示产品的市场规模和需求对价格的敏感系数. 令 $p = w + u$, u 表示零售商的单位净利润, 即相对于批发价格的价格增量. 不失一般性, $p > w > c_m$, 保证制造商和零售商有利可图.

制造商和零售商风险中立且信息完全对称,二者进行斯塔克伯格博弈.假设企业已经具备实施再制造的技术和能力,不考虑前期固定投资.企业可以购买原材料生产新产品,也可以利用回收的废旧品生产再制品,由于再制造的成本优势,企业总是选择优先使用废旧品.根据 Agrawal 等^[34-36]的研究,本文环境绩效是在企业利润最大化基础上从产品全生命周期的视角来分析讨论,考虑新产品生产和使用、再制品生产和使用、废旧品处置以及回收等环节,单位环境影响分别表示为 $i_p, i_u, i'_p, i'_u, i_d, i_c$.生产单位新产品比生产单位再制品的环境影响大,即 $i_p > i'_p$ ^[2],使用再制品产生的环境影响高于使用新产品,即 $i'_u > i_u$ ^[28,34].

考虑制造商回收和零售商回收两种回收方式,以及制造商领导和零售商领导两种渠道权力结构,本文构建了正向供应链的两种决策模型和闭环供应链的四种决策模型.闭环供应链四种决策模型分别为:1) 制造商是领导者同时回收废旧品(模型 M-M);2) 制造商为领导者,零售商回收废旧品(模型 M-R);3) 零售商为领导者,制造商回收废旧品(模型 R-M);4) 零售商为领导者同时回收废旧品(模型 R-R).其中,制造商作为闭环供应链领导者又从事回收的企业包括利盟,施乐,和惠普.如利盟为了回收墨盒向消费者承诺,如果消费者归还空墨盒,那么再次购买新墨盒时可享受 30 美元的价格优惠^[32],施乐设置专门的邮箱以便从消费者手中回收废旧墨盒^[10],惠普在美国设立两个工厂负责废旧电脑的回收和处理^[33].制造商作为领导者委托零售商回收废旧品的企业一般是消费品制造商,如伊士曼柯达公司通过大型零售商回收其一次性相机^[10],戴尔委托 Goodwill 回收其废旧电子产品^[32].零售商为领导者,制造商回收废旧品这种模式在大型零售商与家电制造商之中比较常见,如海尔、长虹的产品在苏宁和国美进行销售,而废旧品则是由厂商参与回收处理^[33].零售商作为领导者同时从事回收的典型企业为 H&M 公司, H&M 于 2013 年开始了废旧衣物回收计划,通过支付消费者固定折扣券来回收废旧衣物^[32].

2.2 正向供应链决策模型

在正向供应链中,制造商委托专门的单位回收和处置废旧品,不对废旧品进行再制造.当制造商为领导者时(模型 M),决策顺序为:制造商先确定批发价格 w^k ,零售商随后决策价格增量 u^k .当零售商为领导者时(模型 R),决策顺序为:零售商先决策价格增量 u^k ,制造商再决策批发价格 w^k .正向供应链下制造商和零售商的利润最大化决策模型分别为

$$\text{Max}_{w^k} \Pi_m^k = (w^k - c_m - c_d)q^k = (w^k - c_m - c_d)[\alpha - \beta(w^k + u^k)], \tag{1}$$

$$\text{Max}_{u^k} \Pi_r^k = (p^k - w^k)q^k = u^k[\alpha - \beta(w^k + u^k)], \tag{2}$$

其中 $k \in \{m, r\}$, $k = m$ 表示制造商为领导者, $k = r$ 表示零售商为领导者.

对 Π_m^k 求关于 w^k 的二阶导数,可知 $\frac{d^2 \Pi_m^k}{d(w^k)^2} = -2\beta < 0$,对 Π_r^k 求关于 u^k 的二阶导数,可知 $\frac{d^2 \Pi_r^k}{d(u^k)^2} = -2\beta < 0$,所以 Π_m^k 是关于 w^k 的严格凹函数, Π_r^k 是关于 u^k 的严格凹函数.

引理 1 制造商利润 Π_m^k 和零售商利润 Π_r^k 是分别关于 w^k 和 u^k 的严格凹函数.

根据逆向递推法可求解出正向供应链模型 M 和模型 R 的均衡解,结果如表 1 所示.证明过程省略.

表 1 正向供应链均衡解

Table 1 Equilibrium solutions to the forward supply chain

| 模型 | p^* | w^* | q^* | Π_m^* | Π_r^* | Π_t^* |
|------|--|---|--|--|--|---|
| 模型 M | $\frac{3\alpha + \beta c_m + \beta c_d}{4\beta}$ | $\frac{\alpha + \beta c_m + \beta c_d}{2\beta}$ | $\frac{\alpha - \beta c_m - \beta c_d}{4}$ | $\frac{(\alpha - \beta c_m - \beta c_d)^2}{8\beta}$ | $\frac{(\alpha - \beta c_m - \beta c_d)^2}{16\beta}$ | $\frac{3(\alpha - \beta c_m - \beta c_d)^2}{16\beta}$ |
| 模型 R | $\frac{3\alpha + \beta c_m + \beta c_d}{4\beta}$ | $\frac{\alpha + 3\beta c_m + 3\beta c_d}{4\beta}$ | $\frac{\alpha - \beta c_m - \beta c_d}{4}$ | $\frac{(\alpha - \beta c_m - \beta c_d)^2}{16\beta}$ | $\frac{(\alpha - \beta c_m - \beta c_d)^2}{8\beta}$ | $\frac{3(\alpha - \beta c_m - \beta c_d)^2}{16\beta}$ |

定理 1 正向供应链中,销售价格满足 $p^{m*} = p^{r*}$,市场需求满足 $q^{m*} = q^{r*}$,批发价格满足 $w^{m*} > w^{r*}$,制造商利润满足 $\Pi_m^{m*} > \Pi_m^{r*}$,零售商利润满足 $\Pi_r^{m*} < \Pi_r^{r*}$,供应链系统利润满足 $\Pi_t^{m*} = \Pi_t^{r*}$.

从表 1 可知,正向供应链的产品销售价格、市场需求和供应链系统利润不受渠道权力结构影响,而批发价格、制造商和零售商利润则受其影响,制造商为领导者时的批发价格和制造商利润均高于零售商为领导

者时的批发价格和制造商利润, 零售商为领导者时的零售商利润则优于其作为跟随者时的利润. 这反应了供应链领导者具有先动优势, 可以通过提高批发价格而获取更高利润. 此外, 由于产品销售价格和市场需求不受渠道权力结构影响, 所以供应链系统利润在两种渠道权力结构下相同.

2.3 闭环供应链决策模型

1) 模型 M-M: 制造商为领导者同时回收废旧品

在这一模型中, 制造商是供应链领导者同时回收废旧品, 零售商为跟随者. 决策顺序为制造商先决策回收率 τ^{mm} 和批发价格 w^{mm} , 零售商根据制造商决策结果确定价格增量 u^{mm} . 制造商和零售商的利润最大化决策模型分别为

$$\text{Max}_{w^{mm}, \tau^{mm}} \Pi_m^{mm} = (w^{mm} - c_m + \Delta\tau^{mm})q^{mm} - \frac{1}{2}\varepsilon(\tau^{mm})^2 - (1 - \tau^{mm})c_d q^{mm}, \quad (3)$$

$$\text{Max}_{u^{mm}} \Pi_r^{mm} = u^{mm}q^{mm} = u^{mm}[\alpha - \beta(w^{mm} + u^{mm})]. \quad (4)$$

引理 2 当 $4\varepsilon > \beta(\Delta + c_d)^2$ 时, 制造商利润 Π_m^{mm} 是关于 w^{mm} 和 τ^{mm} 的严格凹函数, 零售商利润 Π_r^{mm} 是关于 u^{mm} 的严格凹函数.

根据逆向递推法可求解出闭环供应链模型 M-M 的均衡解, 结果见表 2, 制造商和零售商利润见表 3, 证明见附录.

2) 模型 R-M: 零售商为领导者, 制造商回收废旧品

在这一模型中, 制造商是跟随者并且回收废旧品, 零售商是领导者. 决策顺序为零售商先决策价格增量 u^{rm} , 制造商再决策回收率 τ^{rm} 和批发价格 w^{rm} . 制造商和零售商的利润最大化决策模型分别为

$$\text{Max}_{w^{rm}, \tau^{rm}} \Pi_m^{rm} = (w^{rm} - c_m + \Delta\tau^{rm})q^{rm} - \frac{1}{2}\varepsilon(\tau^{rm})^2 - (1 - \tau^{rm})c_d q^{rm}, \quad (5)$$

$$\text{Max}_{u^{rm}} \Pi_r^{rm} = u^{rm}q^{rm} = u^{rm}[\alpha - \beta(w^{rm} + u^{rm})]. \quad (6)$$

引理 3 当 $2\varepsilon > \beta(\Delta + c_d)^2$ 时, 制造商利润 Π_m^{rm} 是关于 w^{rm} 和 τ^{rm} 的严格凹函数, 零售商利润 Π_r^{rm} 是关于 u^{rm} 的严格凹函数.

利用逆向递推法可求解出闭环供应链模型 R-M 的均衡解, 结果见表 2, 制造商和零售商利润见表 3, 证明见附录.

3) 模型 M-R: 制造商为领导者, 零售商回收废旧品

在这一模型中, 制造商是供应链领导者, 零售商是跟随者并且回收废旧品. 决策顺序为制造商先决策产品批发价格 w^{mr} , 零售商根据批发价格决策价格增量 u^{mr} 和回收率 τ^{mr} . 零售商回收时废旧品时, 制造商以价格 κ 从零售商手中回购废旧品, 由于假定 κ 为外生变量, 根据 Savaskan 等^[10]的思想, 本文先在 κ 一定的情况求解模型最优解, 然后讨论实现制造商或零售商利润最大化的 κ 值. 本文设定当制造商为领导者时, 由制造商决策 κ , 当零售商为领导者时, 由零售商决策 κ , 在这一模型中由制造商决策回购价格 κ . 制造商和零售商的利润最大化决策模型分别为

$$\text{Max}_{w^{mr}} \Pi_m^{mr} = (w^{mr} - c_m + \Delta\tau^{mr})q^{mr} - \kappa\tau^{mr}q^{mr} - (1 - \tau^{mr})c_d q^{mr}, \quad (7)$$

$$\text{Max}_{u^{mr}, \tau^{mr}} \Pi_r^{mr} = u^{mr}q^{mr} - \frac{1}{2}\varepsilon(\tau^{mr})^2 + \kappa\tau^{mr}q^{mr}. \quad (8)$$

引理 4 当 $2\varepsilon > \beta(\Delta + c_d)^2$ 时, 制造商利润 Π_m^{mr} 是关于 w^{mr} 的严格凹函数, 零售商利润 Π_r^{mr} 是关于 u^{mr} 和 τ^{mr} 的严格凹函数. 废旧品回购价格 $\kappa = \Delta + c_d$.

利用逆向递推法可求解出闭环供应链模型 M-R 的均衡解, 结果见表 2, 制造商和零售商利润见表 3, 证明见附录.

4) 模型 R-R: 零售商为领导者同时回收废旧品

在这一模型中, 零售商回收废旧品且是供应链领导者, 制造商为跟随者. 决策顺序为零售商先决策价格增量 u^{rr} 和回收率 τ^{rr} , 制造商随后决策批发价格 w^{rr} . 在最优决策基础上, 由零售商根据其利润决策废旧品回购价格 κ . 制造商和零售商的利润最大化决策模型分别为

$$\text{Max}_{w^{rr}} \Pi_m^{rr} = (w^{rr} - c_m + \Delta\tau^{rr})q^{rr} - \kappa\tau^{rr}q^{rr} - (1 - \tau^{rr})c_dq^{rr}, \quad (9)$$

$$\text{Max}_{u^{rr}, \tau^{rr}} \Pi_r^{rr} = u^{rr}q^{rr} - \frac{1}{2}\varepsilon(\tau^{rr})^2 + \kappa\tau^{rr}q^{rr}. \quad (10)$$

引理 5 当 $4\varepsilon > \beta(\Delta + c_d)^2$ 时, 制造商利润 Π_m^{rr} 是关于 w^{rr} 的严格凹函数, 零售商利润 Π_r^{rr} 是关于 u^{rr} 和 τ^{rr} 的严格凹函数. 废旧品回购价格 $\kappa = \Delta + c_d$.

利用逆向递推法可求解出闭环供应链模型 R-R 的均衡解, 结果见表 2, 制造商和零售商利润见表 3, 证明见附录.

假设 1 为保证闭环供应链销售价格增量 $u > 0$, 假设 $\varepsilon > \beta(\Delta + c_d)^2$, 为保证 $0 < \tau < 1$, 假设 $4\varepsilon > 2\beta(\Delta + c_d)^2 + (\Delta + c_d)(\alpha - \beta c_m - \beta c_d)$.

表 2 闭环供应链均衡解

Table 2 Equilibrium solutions to the closed-loop supply chain

| 模型 | w^* | τ^* | u^* |
|--------|--|--|--|
| 模型 M-M | $\frac{2\varepsilon(\alpha + \beta c_m + \beta c_d) - \alpha\beta(\Delta + c_d)^2}{\beta[4\varepsilon - \beta(\Delta + c_d)^2]}$ | $\frac{(\Delta + c_d)(\alpha - \beta c_m - \beta c_d)}{4\varepsilon - \beta(\Delta + c_d)^2}$ | $\frac{\varepsilon(\alpha - \beta c_m - \beta c_d)}{\beta[4\varepsilon - \beta(\Delta + c_d)^2]}$ |
| 模型 R-M | $\frac{\varepsilon(\alpha + 3\beta c_m + 3\beta c_d) - \beta(\Delta + c_d)^2(\alpha + \beta c_m + \beta c_d)}{2\beta[2\varepsilon - \beta(\Delta + c_d)^2]}$ | $\frac{(\Delta + c_d)(\alpha - \beta c_m - \beta c_d)}{2[2\varepsilon - \beta(\Delta + c_d)^2]}$ | $\frac{\alpha - \beta c_m - \beta c_d}{2\beta}$ |
| 模型 M-R | $\frac{\alpha + \beta c_m + \beta c_d}{2\beta}$ | $\frac{(\Delta + c_d)(\alpha - \beta c_m - \beta c_d)}{2[2\varepsilon - \beta(\Delta + c_d)^2]}$ | $\frac{(\alpha - \beta c_m - \beta c_d)[\varepsilon - \beta(\Delta + c_d)^2]}{2\beta[2\varepsilon - \beta(\Delta + c_d)^2]}$ |
| 模型 R-R | $\frac{\varepsilon(\alpha + 3\beta c_m + 3\beta c_d) - \beta(\Delta + c_d)^2(\beta c_m + \beta c_d)}{\beta[4\varepsilon - \beta(\Delta + c_d)^2]}$ | $\frac{(\Delta + c_d)(\alpha - \beta c_m - \beta c_d)}{4\varepsilon - \beta(\Delta + c_d)^2}$ | $\frac{(\alpha - \beta c_m - \beta c_d)[2\varepsilon - \beta(\Delta + c_d)^2]}{\beta[4\varepsilon - \beta(\Delta + c_d)^2]}$ |

表 3 闭环供应链制造商及零售商利润

Table 3 Economic profits of the manufacturer and retailer in the closed-loop supply chain

| 模型 | 模型 M-M | 模型 R-M | 模型 M-R | 模型 R-R |
|-----------|---|--|--|---|
| Π_m^* | $\frac{\varepsilon(\alpha - \beta c_m - \beta c_d)^2}{2\beta[4\varepsilon - \beta(\Delta + c_d)^2]}$ | $\frac{\varepsilon(\alpha - \beta c_m - \beta c_d)^2}{8\beta[2\varepsilon - \beta(\Delta + c_d)^2]}$ | $\frac{\varepsilon(\alpha - \beta c_m - \beta c_d)^2}{4\beta[2\varepsilon - \beta(\Delta + c_d)^2]}$ | $\frac{\varepsilon^2(\alpha - \beta c_m - \beta c_d)^2}{\beta[4\varepsilon - \beta(\Delta + c_d)^2]^2}$ |
| Π_r^* | $\frac{\varepsilon^2(\alpha - \beta c_m - \beta c_d)^2}{\beta[4\varepsilon - \beta(\Delta + c_d)^2]^2}$ | $\frac{\varepsilon(\alpha - \beta c_m - \beta c_d)^2}{4\beta[2\varepsilon - \beta(\Delta + c_d)^2]}$ | $\frac{\varepsilon(\alpha - \beta c_m - \beta c_d)^2}{8\beta[2\varepsilon - \beta(\Delta + c_d)^2]}$ | $\frac{\varepsilon(\alpha - \beta c_m - \beta c_d)^2}{2\beta[4\varepsilon - \beta(\Delta + c_d)^2]}$ |

2.4 正向与闭环供应链环境绩效

根据产品全生命周期环境影响评价思想, 本文考虑产品生产、使用、回收和处置四个环节产生的环境影响. 在正向供应链中, 环境影响来自新产品生产、使用以及废旧品处置环节. 令 E_t^k 表示 k 企业为领导者时的正向供应链系统环境绩效, k 企业为制造商 m 或零售商 r . 当制造商和零售商取得利润最大化时, E_t^k 为

$$E_t^k = (i_p + i_u + i_d)q^k. \quad (11)$$

在闭环供应链中, 环境影响来自新产品和再制造品生产、使用以及废旧品回收和处置环节. 令 E_t^{ij} 表示 i 企业为领导者 j 企业回收废旧品情形下的闭环供应链系统环境绩效, i 企业和 j 企业既可以是制造商 m , 也可以是零售商 r . 当制造商和零售商取得利润最大化时, E_t^{ij} 为

$$E_t^{ij} = (i_p + i_u + i_d)(1 - \tau^{ij})q^{ij} + (i'_p + i'_u + i_c)\tau^{ij}q^{ij}. \quad (12)$$

闭环供应链的环境绩效由两部分组成, 第一部分表示新产品生产、使用和未回收废旧品处置环节产生的环境影响, 第二部分表示再制造品生产、使用和废旧品回收环节产生的环境影响. 根据制造商和零售商利润最大化时的均衡解可得出正向供应链和闭环供应链系统环境绩效, 结果见表 4.

表 4 正向及闭环供应链环境绩效

Table 4 Overall environmental performance of the forward and closed-loop supply chains

| 模型 | E_t^{k*} | E_t^{ij*} |
|--------|---|---|
| 模型 M | $\frac{(i_p+i_u+i_d)(\alpha-\beta c_m-\beta c_d)}{4}$ | N/A |
| 模型 R | $\frac{(i_p+i_u+i_d)(\alpha-\beta c_m-\beta c_d)}{4}$ | N/A |
| 模型 M-M | N/A | $\frac{\varepsilon(i_p+i_u+i_d)(\alpha-\beta c_m-\beta c_d)}{4\varepsilon-\beta(\Delta+c_d)^2} - \frac{\varepsilon(\Delta+c_d)(i_p+i_u+i_d-i'_p-i'_u-i_c)(\alpha-\beta c_m-\beta c_d)^2}{[4\varepsilon-\beta(\Delta+c_d)^2]^2}$ |
| 模型 R-M | N/A | $\frac{\varepsilon(i_p+i_u+i_d)(\alpha-\beta c_m-\beta c_d)}{2[2\varepsilon-\beta(\Delta+c_d)^2]} - \frac{\varepsilon(\Delta+c_d)(i_p+i_u+i_d-i'_p-i'_u-i_c)(\alpha-\beta c_m-\beta c_d)^2}{4[2\varepsilon-\beta(\Delta+c_d)^2]^2}$ |
| 模型 M-R | N/A | $\frac{\varepsilon(i_p+i_u+i_d)(\alpha-\beta c_m-\beta c_d)}{2[2\varepsilon-\beta(\Delta+c_d)^2]} - \frac{\varepsilon(\Delta+c_d)(i_p+i_u+i_d-i'_p-i'_u-i_c)(\alpha-\beta c_m-c_d)^2}{4[2\varepsilon-\beta(\Delta+c_d)^2]^2}$ |
| 模型 R-R | N/A | $\frac{\varepsilon(i_p+i_u+i_d)(\alpha-\beta c_m-\beta c_d)}{4\varepsilon-\beta(\Delta+c_d)^2} - \frac{\varepsilon(\Delta+c_d)(i_p+i_u+i_d-i'_p-i'_u-i_c)(\alpha-\beta c_m-\beta c_d)^2}{[4\varepsilon-\beta(\Delta+c_d)^2]^2}$ |

3 模型对比分析

前面建立了两种正向供应链决策模型和四种闭环供应链决策模型, 并通过逆向递推法得出了均衡解. 本节通过对比不同闭环供应链决策模型均衡解, 分析不同渠道权力结构和不同回收方式对生产决策、回收率、利润和环境产生的影响. 然后通过比较正向供应链和闭环供应链决策模型的均衡解, 分析企业实施闭环供应链在经济和环境方面产生的变化. 最后探讨企业实施闭环供应链的条件以及不同渠道权力结构下的最优回收方式.

3.1 闭环供应链不同决策模型间对比

定理 2 制造商作为供应链领导者, Π_m^{mr*} 和 Π_r^{mr*} 是关于 κ 的递增函数, 当 $\kappa = \Delta + c_d$ 时, 制造商和零售商利润取得最大值; 零售商作为供应链领导者, Π_m^{rr*} 和 Π_r^{rr*} 是关于 κ 的先减后增函数, 当 $\kappa = \frac{\Delta+c_d}{2}$ 时, 制造商和零售商利润取最小值, 当 $\kappa = \Delta + c_d$ 时, 制造商和零售商利润取得最大值. 证明参见附录引理 4 和引理 5.

定理 2 表明当零售商回收废旧品时, 制造商领导和零售商领导时的废旧品回购价格相同, 制造商将再制造节约的单位成本 $\Delta + c_d$ 全部转给零售商, 即 $\kappa = \Delta + c_d$, 制造商不直接从废旧品再制造获利. 当制造商是领导者时, 回购价格由制造商决策, 出现这一结果是反常但又合理的. 因为对零售商来说, 其获利来源于两方面, 一是产品销售净利润 uq , 二是废旧品转让收入 $\kappa\tau q$, 制造商以最高价格回购废旧品会激励零售商提高回收率, 另一方面也能促使零售商降低销售价格, 从而提高产品需求和废旧品回收数量. 对于制造商来说, 虽然将废旧品再制造节约的成本转移给零售商, 但是较高市场需求提高了产品销售收入, Savaskan 等^[10]得出了相同的结论. 零售商为领导者时, 具有回购价格决策权, 由于零售商利润是关于 κ 的先减后增函数, 所以 $\kappa = \Delta + c_d$ 实现零售商利润最大化.

定理 3 相同渠道权力结构下, 批发价格满足 $w^{mm*} < w^{mr*}$, $w^{rm*} < w^{rr*}$. 相同回收方式下, 批发价格满足 $w^{mm*} > w^{rm*}$, $w^{mr*} > w^{rr*}$. 四种决策模型下, 批发价格满足 $w^{rm*} < w^{rr*} < w^{mm*} < w^{mr*}$.

证明 根据表 2, $w^{mm*} - w^{mr*} = \frac{-\beta(\Delta + c_d)^2(\alpha - \beta c_m - \beta c_d)}{2\beta[4\varepsilon - \beta(\Delta + c_d)^2]} < 0$. 同理可证 $w^{rm*} < w^{rr*}$, $w^{mm*} > w^{rm*}$, $w^{mr*} > w^{rr*}$. $w^{mm*} - w^{rr*} = \frac{\varepsilon - \beta(\Delta + c_d)^2}{\beta[4\varepsilon - \beta(\Delta + c_d)^2]}$, 根据假设 1 可知 $w^{rr*} < w^{mm*}$.

证毕.

定理 3 表明, 在相同渠道权力结构下, 零售商回收时的批发价格高于制造商回收时的批发价格. 原因在于, 零售商回收时, 根据定理 2, 回购价格为 $\kappa = \Delta + c_d$, 也就是制造商通过再制造节约的单位成本为 0, 而制造商回收时, 通过再制造节约的单位成本为 $\Delta + c_d$, 由于制造商回收时制造商通过再制造节约的成本高于零售商回收时制造商节约的成本, 所以零售商回收时, 制造商会制定较高的批发价格. 另一方面, 相同回

收方式下, 制造商领导时的批发价格高于零售商领导时的批发价格, 这一结论印证了领导者企业总是利用自身权力为自己谋取更高利益.

定理 4 相同渠道权力结构下, 销售价格增量、销售价格和市场需求满足 $u^{mm*} > u^{mr*}$, $u^{rm*} > u^{rr*}$, $p^{mm*} > p^{mr*}$, $p^{rr*} > p^{rm*}$, $q^{mr*} > q^{mm*}$, $q^{rm*} > q^{rr*}$. 相同回收方式下, 销售价格增量、销售价格和市场需求满足 $u^{mm*} < u^{rm*}$, $u^{mr*} < u^{rr*}$, $p^{mm*} > p^{rm*}$, $p^{rr*} > p^{mr*}$, $q^{mm*} < q^{rm*}$, $q^{rr*} < q^{mr*}$. 四种决策模型下, 销售价格增量、销售价格和市场需求满足 $u^{mr*} < u^{mm*} < u^{rr*} < u^{rm*}$, $p^{mr*} = p^{rm*} < p^{mm*} = p^{rr*}$, $q^{rr*} = q^{mm*} < q^{rm*} = q^{mr*}$.

证明 根据表 2 可知 $p^{mm*} = p^{rr*}$, $p^{mr*} = p^{rm*}$. $u^{mm*} - u^{mr*} = \frac{(\alpha - \beta c_m - \beta c_d)(\Delta + c_d)^2 [3\varepsilon - \beta(\Delta + c_d)^2]}{2[2\varepsilon - \beta(\Delta + c_d)^2][4\varepsilon - \beta(\Delta + c_d)^2]} > 0$. 同理 $u^{rm*} > u^{rr*}$, $u^{mm*} < u^{rm*}$, $u^{mm*} < u^{rr*}$. $u^{mr*} - u^{rr*} = \frac{(\alpha - \beta c_m - \beta c_d)[-4\varepsilon^2 + 3\varepsilon(\Delta + c_d)^2 - \beta^2(\Delta + c_d)^4]}{2\beta[2\varepsilon - \beta(\Delta + c_d)^2][4\varepsilon - \beta(\Delta + c_d)^2]}$, 设 $f(\varepsilon) = -4\varepsilon^2 + 3\varepsilon(\Delta + c_d)^2 - \beta^2(\Delta + c_d)^4$, 可知 $f(\varepsilon)$ 无实根, 所以 $f(\varepsilon) < 0$ 恒成立, 则 $u^{mr*} < u^{rr*}$. 由 $p^{mm*} - p^{mr*} = \frac{\varepsilon(\alpha - \beta c_m - \beta c_d)(\Delta + c_d)^2}{2[2\varepsilon - \beta(\Delta + c_d)^2][4\varepsilon - \beta(\Delta + c_d)^2]} > 0$ 可得出销售价格间的关系, 进而可知市场需求间的关系.

证毕.

定理 4 表明相同渠道权力结构下, 零售商回收时的价格增量低于制造商回收时的价格增量. 原因在于, 以制造商为供应链领导者为例, 制造商回收废旧品时, 零售商只有产品销售利润 uq , 所以通过提高价格增量来提高利润, 而零售商回收废旧品时, 其收入包括产品销售净利润 uq 和废旧品转让收入 $(\Delta + c_d)\tau q$, 废旧品转让收入让零售商不会设置太高的价格增量. 同理, 零售商为领导者时, 也表现出零售商回收时较低价格增量的现象. 相同回收方式下, 零售商为领导者时的价格增量更高, 体现出具有领导权的企业会作出更有利于自身利益的决策.

定理 5 相同渠道权利结构下, 回收率满足 $\tau^{mm*} < \tau^{mr*}$, $\tau^{rr*} < \tau^{rm*}$. 相同回收方式下, 回收率满足 $\tau^{mm*} < \tau^{rm*}$, $\tau^{rr*} < \tau^{mr*}$. 四种决策模型下, 回收率满足 $\tau^{rr*} = \tau^{mm*} < \tau^{mr*} = \tau^{rm*}$, 并且回收率是关于单位生产成本节约 Δ 的递增函数.

证明 根据表 2 可知 $\tau^{rr*} = \tau^{mm*}$, $\tau^{mr*} = \tau^{rm*}$, 由 $4\varepsilon - \beta(\Delta + c_d)^2 > 2[2\varepsilon - \beta(\Delta + c_d)^2]$, 可知 $\tau^{mm*} < \tau^{mr*}$. 证毕.

定理 5 说明当制造商为领导者时, 由零售商回收, 回收率更高, 当零售商为领导者时, 由制造商回收, 回收率更高. 制造商为领导者时, 制造商回收废旧品, 通过再制造节约的单位成本为 $\Delta + c_d$, 零售商转让废旧品获得单位收益为 $\kappa = \Delta + c_d$. 虽然二者通过回收获得单位收益相同, 但是零售商通过产品销售价格可以直接影响市场需求, 而制造商通过批发价格间接影响市场需求. 由定理 4 可知 $p^{mm*} > p^{mr*}$, $q^{mm*} < q^{mr*}$, 所以零售商回收时的经济激励更大, 即 $(\Delta + c_d)q^{mr*} > (\Delta + c_d)q^{mm*}$, 因此回收率更高. 当零售商为领导者时, 同样的虽然制造商回收时, 通过再制造节约的成本与零售商回收时获得的收益相同, 但是零售商回收时的批发价格过高导致 $p^{rr*} > p^{rm*}$, 从而 $q^{rr*} < q^{rm*}$, 所以制造商回收时经济激励更大, 即 $(\Delta + c_d)q^{rm*} > (\Delta + c_d)q^{rr*}$, 因此回收率更高. 另外, 制造商和零售商既是领导者又是回收者时的回收率低于其只具有一项权力时的回收率.

这一命题表明制造商为领导者的情况下, 应委托零售商回收废旧品, 反之, 制造商应直接进行废旧品回收, 以便更多利用废旧品避免资源浪费. 此外, 回收率与节约的单位生产成本正相关, 那么通过再制造节约成本高的企业, 可以通过加大回收投资提高废旧品回收率, 以便获得更多收益. 若以回收率作为企业实施闭环供应链的环境绩效, 那么由跟随者企业回收时的环境绩效优于领导者企业回收时的环境绩效.

定理 6 相同渠道权力结构下, 制造商和零售商利润满足 $\Pi_m^{mm*} < \Pi_m^{mr*}$, $\Pi_m^{rr*} < \Pi_m^{rm*}$, $\Pi_r^{mm*} < \Pi_r^{mr*}$, $\Pi_r^{rr*} < \Pi_r^{rm*}$. 相同回收方式下, 制造商和零售商利润满足 $\Pi_m^{mm*} < \Pi_m^{rm*}$, $\Pi_m^{rr*} < \Pi_m^{mr*}$, $\Pi_r^{mm*} < \Pi_r^{rm*}$, $\Pi_r^{mr*} < \Pi_r^{rr*}$. 四种决策模型下, 制造商和零售商利润满足 $\Pi_m^{mr*} > \Pi_m^{mm*} > \Pi_m^{rm*} > \Pi_m^{rr*}$, $\Pi_r^{rm*} > \Pi_r^{rr*} > \Pi_r^{mr*} > \Pi_r^{mm*}$.

证明 根据表 3 可知 $\Pi_m^{mm*} < \Pi_m^{mr*}, \Pi_m^{rm*} - \Pi_m^{rr*} = \frac{\beta\varepsilon(\Delta+c_d)^4(\alpha-\beta c_m-\beta c_d)^2}{8[2\varepsilon-\beta(\Delta+c_d)^2][4\varepsilon-\beta(\Delta+c_d)^2]^2} > 0$. 由假设 1 可知 $\Pi_m^{mm*} - \Pi_m^{rm*} = \frac{\varepsilon(\alpha-\beta c_m-\beta c_d)^2[4\varepsilon-3\beta(\Delta+c_d)^2]}{8\beta[2\varepsilon-\beta(\Delta+c_d)^2][4\varepsilon-\beta(\Delta+c_d)^2]} > 0$. $\Pi_m^{mr*} - \Pi_m^{rr*} = \frac{\varepsilon(\alpha-\beta c_m-\beta c_d)^2[8\varepsilon^2+\beta^2(\Delta+c_d)^4-4\beta\varepsilon(\Delta+c_d)^2]}{4\beta[2\varepsilon-\beta(\Delta+c_d)^2][4\varepsilon-\beta(\Delta+c_d)^2]^2}$, 设 $f(\varepsilon) = 8\varepsilon^2 + \beta^2(\Delta + c_d)^4 - 4\beta\varepsilon(\Delta + c_d)^2$, 可知 $f(\varepsilon)$ 无实根, 所以 $f(\varepsilon) > 0$ 恒成立, 则 $\Pi_m^{mr*} > \Pi_m^{rr*}$. 同理可证零售商利润在四种决策模型中的关系. 证毕.

定理 6 表明制造商为领导者, 零售商回收废旧品时的制造商和零售商利润均高于制造商回收时的制造商和零售商利润, 零售商为领导者, 制造商回收时的制造商和零售商利润均高于零售商回收时的制造商和零售商利润. 从定理 4 和定理 5 来看, 制造商为领导者时, 零售商回收的回收率和市场需求更高, 从而制造商和零售商利润较大, 反之, 零售商为领导者时, 制造商回收的回收率和市场需求更高, 从而制造商和零售商利润均高于零售商回收时的利润. 另外, 在同一回收方式下, 制造商为领导者时的制造商利润更高, 零售商为领导者时的零售商利润更高, 这表明领导者企业的先动优势为企业赢取更高利益. 根据以上定理可知, 当制造商为供应链领导者时, 制造商应将废旧品回收工作委托给零售商, 既提高回收率又使制造商和零售商获得较高经济利益, 反之, 零售商为领导者, 则制造商直接回收废旧品, 制造商和零售商的利润和回收率更好.

$$\text{令 } L_1 = \frac{\beta(\Delta+c_d)[4\varepsilon-\beta(\Delta+c_d)^2]}{4\varepsilon(\alpha-\beta c_m-\beta c_d)}, L_2 = \frac{\beta(\Delta+c_d)[2\varepsilon-\beta(\Delta+c_d)^2]}{\varepsilon(\alpha-\beta c_m-\beta c_d)}, L_3 = \frac{2[2\varepsilon-\beta(\Delta+c_d)^2][4\varepsilon-\beta(\Delta+c_d)^2]}{(\Delta+c_d)(\alpha-\beta c_m-\beta c_d)[8\varepsilon-3\beta(\Delta+c_d)^2]}.$$

定理 7 (a) 相同渠道权力结构下, 闭环供应链系统利润满足 $\Pi_t^{mm*} < \Pi_t^{mr*}, \Pi_t^{rr*} < \Pi_t^{rm*}$. 相同回收方式下, 闭环供应链系统利润满足 $\Pi_t^{mm*} < \Pi_t^{mr*}, \Pi_t^{rr*} < \Pi_t^{rm*}$. 四种决策模型下, 闭环供应链系统利润满足 $\Pi_t^{rm*} = \Pi_t^{mr*} > \Pi_t^{mm*} = \Pi_t^{rr*}$.

(b) 相同渠道权力结构下, 闭环供应链环境绩效满足: i) 当 $0 < \frac{i'_p+i'_c+i'_u}{i_p+i_d+i_u} < 1 - L_3$ 时, $E_t^{mr*} < E_t^{mm*}, E_t^{rm*} < E_t^{rr*}$; ii) 当 $\frac{i'_p+i'_c+i'_u}{i_p+i_d+i_u} \geq 1 - L_3$ 时, $E_t^{mm*} \leq E_t^{mr*}, E_t^{rr*} \leq E_t^{rm*}$. 相同回收方式下, 闭环供应链环境绩效满足: i) 当 $0 < \frac{i'_p+i'_c+i'_u}{i_p+i_d+i_u} < 1 - L_3$ 时, $E_t^{rm*} < E_t^{mm*}, E_t^{mr*} < E_t^{rr*}$; ii) 当 $\frac{i'_p+i'_c+i'_u}{i_p+i_d+i_u} \geq 1 - L_3$ 时, $E_t^{mm*} \leq E_t^{rm*}, E_t^{rr*} \leq E_t^{mr*}$. 四种决策模型下, 闭环供应链环境绩效满足: i) 当 $0 < \frac{i'_p+i'_c+i'_u}{i_p+i_d+i_u} < 1 - L_3$ 时, $E_t^{rr*} = E_t^{mm*} > E_t^{rm*} = E_t^{mr*}$; ii) 当 $\frac{i'_p+i'_c+i'_u}{i_p+i_d+i_u} \geq 1 - L_3$ 时, $E_t^{rr*} = E_t^{mm*} \leq E_t^{rm*} = E_t^{mr*}$.

证明 从表 3 可知 $\Pi_t^{rr*} = \Pi_t^{mm*}, \Pi_t^{rm*} = \Pi_t^{mr*}$. 根据定理 6 易知 $\Pi_t^{mm*} < \Pi_t^{mr*}, \Pi_t^{rr*} < \Pi_t^{rm*}$. 从表 4 可知 $E_t^{rr*} = E_t^{mm*}, E_t^{rm*} = E_t^{mr*}$. $E_t^{mm*} - E_t^{mr*} = \frac{-\beta\varepsilon(i_p+i_d+i_u)(\alpha-\beta c_m-\beta c_d)(\Delta+c_d)^2}{2[2\varepsilon-\beta(\Delta+c_d)^2][4\varepsilon-\beta(\Delta+c_d)^2]} + \frac{\beta\varepsilon(\alpha-\beta c_m-\beta c_d)^2(\Delta+c_d)^3(i_p+i_d+i_u-i'_u-i'_p-i'_c)[8\varepsilon-3\beta(\Delta+c_d)^2]}{4[2\varepsilon-\beta(\Delta+c_d)^2]^2[4\varepsilon-\beta(\Delta+c_d)^2]^2}$, 当 $0 < \frac{i'_p+i'_c+i'_u}{i_p+i_d+i_u} < 1 - \frac{2[2\varepsilon-\beta(\Delta+c_d)^2][4\varepsilon-\beta(\Delta+c_d)^2]}{(\Delta+c_d)(\alpha-\beta c_m-\beta c_d)[8\varepsilon-3\beta(\Delta+c_d)^2]}$ 时, $E_t^{mm*} > E_t^{mr*}$, 当 $\frac{i'_p+i'_c+i'_u}{i_p+i_d+i_u} \geq 1 - \frac{2[2\varepsilon-\beta(\Delta+c_d)^2][4\varepsilon-\beta(\Delta+c_d)^2]}{(\Delta+c_d)(\alpha-\beta c_m-\beta c_d)[8\varepsilon-3\beta(\Delta+c_d)^2]}$ 时, $E_t^{mm*} \leq E_t^{mr*}$. 证毕.

定理 7 表明当制造商或零售商为领导者, 由跟随者企业回收时的供应链系统利润更高, 原因是制造商或零售商为领导者, 跟随者企业回收时的制造商和零售商利润均高于领导者企业回收时的制造商和零售商利润. 另外, 闭环供应链策略下, 再制造品生产、使用和废旧品回收环节的单位环境影响之和, 相对于新产品生产、使用和废旧品处置环节的单位环境影响之和较小时, 制造商或零售商为领导者由跟随者企业回收对环境更好; 反之, 制造商或零售商为领导者由领导者企业回收对环境更好. 这表明若产品回收再制造简单易操作, 使用再制造品对环境影响较小, 如衣物、家具和自行车, 由跟随者企业回收废旧品更加环保; 反之, 若产品回收再制造复杂且耗能较多, 使用再制造品对环境影响较大, 如打印机和复印机, 由供应链领导企业承担回收工作更合理, 因为领导企业一般资金实力雄厚, 有能力构建一定规模的回收点, 进行批量回收处理从而降低回收过程的环境影响.

3.2 正向供应链与闭环供应链对比

定理 8 相同渠道权力结构下, 正向与闭环供应链的批发价格满足 $w^{mm*} < w^{m*} = w^{mr*}, w^{rm*} < w^{r*} < w^{rr*}$. 不同渠道权力结构下, 正向与闭环供应链的批发价格满足 $w^{rm*} < w^{r*} < w^{rr*} < w^{mm*} < w^{m*} = w^{mr*}$.

证明 根据定理3结合表1可知, $w^{mm*} < w^{m*} = w^{mr*}$. $w^{r*} - w^{rr*} = \frac{-(\Delta+c_d)^2(\alpha-\beta c_m-\beta c_d)}{4[4\varepsilon-\beta(\Delta+c_d)^2]} < 0$, $w^{rm*} - w^{r*} = \frac{-(\alpha-\beta c_m-\beta c_d)\beta(\Delta+c_d)^2}{4\beta[2\varepsilon-\beta(\Delta+c_d)^2]} < 0$, 所以 $w^{rm*} < w^{r*} < w^{rr*}$. 结合定理3可得出正向与闭环供应链的批发价格关系. 证毕.

定理8说明制造商为领导者时, 两种回收方式下的批发价格都不高于正向供应链批发价格, 而零售商为领导者, 制造商/零售商回收时的批发价格低于/高于正向供应链的批发价格. 原因在于, 制造商为领导者, 相对于不回收, 制造商回收可以获得额外的成本节约 $\Delta + c_d$, 激励制造商降低批发价格提高市场需求; 零售商回收时, 制造商将回收所得成本节约全部转移给零售商以激励零售商降价提高需求, 此时制造商仅从产品销售获利, 因此选择与不回收时同样的批发价格. 零售商为领导者, 相对于不回收, 制造商回收时批发价格较低原理同上. 而零售商回收时以 $\kappa = \Delta + c_d$ 将废旧品转让给制造商, 同时以高价销售产品, 即 $p^{rr*} > p^{mr*}$, 导致制造商提高批发价格.

定理9 相同渠道权力结构下, 正向与闭环供应链的销售价格和市场需求满足 $p^{mr*} < p^{mm*} < p^{m*}$, $p^{rm*} < p^{rr*} < p^{r*}$, $q^{mr*} > q^{mm*} > q^{m*}$, $q^{rm*} > q^{rr*} > q^{r*}$. 不同渠道权力结构下, 正向与闭环供应链的销售价格和市场需求满足 $p^{mr*} = p^{rm*} < p^{mm*} = p^{rr*} < p^{m*} = p^{r*}$, $q^{mr*} = q^{rm*} > q^{mm*} = q^{rr*} > q^{m*} = q^{r*}$.

证明 由 $p^{m*} - p^{mm*} = \frac{(\alpha-\beta c_m-\beta c_d)(\Delta+c_d)^2}{4[4\varepsilon-\beta(\Delta+c_d)^2]} > 0$, 结合定理4可得结论. 证毕.

定理9说明闭环供应链的市场需求相对于正向供应链有所提高, 并且制造商或零售商为领导者, 由跟随者企业回收时的需求提高更多. 因为无论是制造商回收还是零售商回收, 回收企业与正向供应链相比实现生产成本节约或收入增加, 这推动企业通过降低批发价格或零售价格来提高需求.

定理10 相同渠道权力结构下, 正向与闭环供应链的制造商和零售商利润满足 $\Pi_m^{mr*} > \Pi_m^{mm*} > \Pi_m^{m*}$, $\Pi_m^{rm*} > \Pi_m^{rr*} > \Pi_m^{r*}$, $\Pi_r^{mr*} > \Pi_r^{mm*} > \Pi_r^{m*}$, $\Pi_r^{rm*} > \Pi_r^{rr*} > \Pi_r^{r*}$. 不同渠道权力结构下, 正向与闭环供应链的制造商和零售商利润满足 $\Pi_m^{mr*} > \Pi_m^{mm*} > \Pi_m^{m*} > \Pi_m^{rm*} > \Pi_m^{rr*} > \Pi_m^{r*}$, $\Pi_r^{rm*} > \Pi_r^{rr*} > \Pi_r^{r*} > \Pi_r^{mr*} > \Pi_r^{mm*} > \Pi_r^{m*}$.

证明 $\Pi_m^{mm*} - \Pi_m^{m*} = \frac{(\alpha-\beta c_m-\beta c_d)^2(\Delta+c_d)^2}{8[4\varepsilon-\beta(\Delta+c_d)^2]} > 0$, 同理可证 $\Pi_m^{rr*} > \Pi_m^{r*}$. $\Pi_m^{rm*} - \Pi_m^{m*} = \frac{-\varepsilon(\alpha-\beta c_m-\beta c_d)^2}{8\beta[2\varepsilon-\beta(\Delta+c_d)^2]} + \frac{(\alpha-\beta c_m-\beta c_d)^2(\Delta+c_d)^2}{8\beta[2\varepsilon-\beta(\Delta+c_d)^2]}$, 根据假设1可知 $\Pi_m^{rm*} < \Pi_m^{m*}$. 结合定理6可得结论. 通过类似方法可得出零售商利润的关系. 证毕.

定理10表明实施闭环供应链后, 制造商和零售商的利润与正向供应链相比均有所改善, 并且跟随者企业进行回收时的利润改善更多.

定理11 (a) 正向与闭环供应链系统利润满足 $\Pi_t^{mr*} = \Pi_t^{mr*} > \Pi_t^{mm*} = \Pi_t^{rr*} > \Pi_t^{m*} = \Pi_t^{r*}$.

(b) 相同渠道权力结构下, 正向与闭环供应链环境绩效满足: i) 当 $\frac{i'_p+i'_u+i_c}{i_p+i_u+i_d} > 1 - L_1$ 时, $E_t^{m*} < E_t^{mm*} < E_t^{mr*}$, $E_t^{r*} < E_t^{rr*} < E_t^{rm*}$; ii) 当 $1 - L_2 < \frac{i'_p+i'_u+i_c}{i_p+i_u+i_d} \leq 1 - L_1$ 时, $E_t^{mm*} \leq E_t^{m*} < E_t^{mr*}$, $E_t^{rr*} \leq E_t^{r*} < E_t^{rm*}$; iii) 当 $1 - L_3 < \frac{i'_p+i'_u+i_c}{i_p+i_u+i_d} \leq 1 - L_2$ 时, $E_t^{mm*} < E_t^{mr*} \leq E_t^{m*}$, $E_t^{rr*} < E_t^{rm*} \leq E_t^{r*}$; iv) 当 $0 < \frac{i'_p+i'_u+i_c}{i_p+i_u+i_d} \leq 1 - L_3$ 时, $E_t^{mr*} \leq E_t^{mm*} < E_t^{m*}$, $E_t^{rm*} \leq E_t^{rr*} < E_t^{r*}$. 不同权力结构下, 正向与闭环供应链环境绩效满足: i) 当 $\frac{i'_p+i'_u+i_c}{i_p+i_u+i_d} > 1 - L_1$ 时, $E_t^{m*} = E_t^{r*} < E_t^{rr*} = E_t^{mm*} < E_t^{mr*} = E_t^{rm*}$; ii) 当 $1 - L_2 < \frac{i'_p+i'_u+i_c}{i_p+i_u+i_d} \leq 1 - L_1$ 时, $E_t^{rr*} = E_t^{mm*} \leq E_t^{m*} = E_t^{r*} < E_t^{mr*} = E_t^{rm*}$; iii) 当 $1 - L_3 < \frac{i'_p+i'_u+i_c}{i_p+i_u+i_d} \leq 1 - L_2$ 时, $E_t^{rr*} = E_t^{mm*} < E_t^{mr*} = E_t^{rm*} \leq E_t^{m*} = E_t^{r*}$; iv) 当 $0 < \frac{i'_p+i'_u+i_c}{i_p+i_u+i_d} \leq 1 - L_3$ 时, $E_t^{mr*} = E_t^{rm*} \leq E_t^{rr*} = E_t^{mm*} < E_t^{m*} = E_t^{r*}$, 其中 $L_1 < L_2 < L_3$.

证明 $\Pi_t^{mm*} - \Pi_t^{m*} = \frac{(\alpha-\beta c_m-\beta c_d)^2(\Delta+c_d)^2[16\varepsilon-3\beta(\Delta+c_d)^2]}{16[4\varepsilon-\beta(\Delta+c_d)^2]^2} > 0$, 由定理7可知 $\Pi_t^{mr*} = \Pi_t^{mr*} > \Pi_t^{mm*} = \Pi_t^{rr*} > \Pi_t^{m*} = \Pi_t^{r*}$. $E_t^{mm*} - E_t^{m*} = \frac{(i_p+i_u+i_d)[\beta(\alpha-\beta c_m-\beta c_d)(\Delta+c_d)^2[4\varepsilon-\beta(\Delta+c_d)^2]-4\varepsilon(\Delta+c_d)(\alpha-\beta c_m-\beta c_d)^2]}{4[4\varepsilon-\beta(\Delta+c_d)^2]^2} +$

$\frac{(i'_p+i'_u+i_c)[4\varepsilon(\Delta+c_d)(\alpha-\beta c_m-\beta c_d)^2]}{4[4\varepsilon-\beta(\Delta+c_d)^2]^2}$, 当 $\frac{i'_p+i'_u+i_c}{i_p+i_u+i_d} > 1 - \frac{\beta(\Delta+c_d)[4\varepsilon-\beta(\Delta+c_d)^2]}{4\varepsilon(\alpha-\beta c_m-\beta c_d)}$ 时, $E_t^{mm*} > E_t^{m*}$, 否则, $E_t^{mm*} \leq E_t^{m*}$.
 $E_t^{mr*} - E_t^{m*} = \frac{(i_p+i_u+i_d)[\beta(\alpha-\beta c_m-\beta c_d)(\Delta+c_d)^2[2\varepsilon-\beta(\Delta+c_d)^2]-\varepsilon(\Delta+c_d)(\alpha-\beta c_m-\beta c_d)^2]+(i'_p+i'_u+i_c)[\varepsilon(\Delta+c_d)(\alpha-\beta c_m-\beta c_d)^2]}{4[2\varepsilon-\beta(\Delta+c_d)^2]^2}$,
 当 $\frac{i'_p+i'_u+i_c}{i_p+i_u+i_d} > 1 - \frac{\beta(\Delta+c_d)[2\varepsilon-\beta(\Delta+c_d)^2]}{\varepsilon(\alpha-\beta c_m-\beta c_d)}$ 时, $E_t^{mr*} > E_t^{m*}$, 否则, $E_t^{mr*} \leq E_t^{m*}$. $L_1 - L_2 = \frac{-\beta(\Delta+c_d)[4\varepsilon-3\beta(\Delta+c_d)^2]}{4\varepsilon(\alpha-\beta c_m-\beta c_d)}$,
 根据假设 1 可知 $L_1 < L_2$. $L_1 - L_3 = \frac{[4\varepsilon-\beta(\Delta+c_d)^2][16\beta\varepsilon(\Delta+c_d)^2-16\varepsilon^2-3\beta^2(\Delta+c_d)^4]}{4\varepsilon(\alpha-\beta c_m-\beta c_d)(\Delta+c_d)[8\varepsilon-3\beta(\Delta+c_d)^2]}$, 设 $f(\varepsilon) = 16\beta\varepsilon(\Delta+c_d)^2 - 16\varepsilon^2 - 3\beta^2(\Delta+c_d)^4$, 当 $\varepsilon = \frac{3\beta(\Delta+c_d)^2}{4}$ 或 $\varepsilon = \frac{\beta(\Delta+c_d)^2}{2}$ 时, $f(\varepsilon) = 0$, 根据假设 1 可知 $L_1 < L_3$.
 $L_2 - L_3 = \frac{[2\varepsilon-\beta(\Delta+c_d)^2][10\beta\varepsilon(\Delta+c_d)^2-8\varepsilon^2-3\beta^2(\Delta+c_d)^4]}{\varepsilon(\alpha-\beta c_m-\beta c_d)(\Delta+c_d)[8\varepsilon-3\beta(\Delta+c_d)^2]}$, 设 $g(\varepsilon) = 10\beta\varepsilon(\Delta+c_d)^2 - 8\varepsilon^2 - 3\beta^2(\Delta+c_d)^4$,
 当 $\varepsilon = \frac{3\beta(\Delta+c_d)^2}{4}$ 或 $\varepsilon = \frac{\beta(\Delta+c_d)^2}{2}$ 时, $g(\varepsilon) = 0$, 根据假设 1 可知 $L_2 < L_3$. 结合定理 7 可得出结论. 证毕.

定理 11 表明, 从供应链系统利润来看, 闭环供应链系统利润总是优于正向供应链的系统利润, 这一结果可根据定理 10 推出. 从供应链环境绩效来看, 当再制品生产、使用和废旧品回收环节的单位环境影响之和, 与新产品生产、使用和废旧品处置环节的单位环境影响之和相比很大时, 即 $i'_p + i'_u + i_c > (i_p + i_u + i_d)(1 - L_1)$, 正向供应链的环境影响低于闭环供应链; 当这一比值有所降低, 满足 $(i_p + i_u + i_d)(1 - L_2) < i'_p + i'_u + i_c \leq (i_p + i_u + i_d)(1 - L_1)$, 领导者企业回收时的环境影响低于正向供应链, 而跟随者企业回收时的环境影响高于正向供应链; 当这一比值进一步降低, 满足 $(i_p + i_u + i_d)(1 - L_3) < i'_p + i'_u + i_c \leq (i_p + i_u + i_d)(1 - L_2)$, 闭环供应链环境绩效优于正向供应链, 并且领导者企业回收时的环境绩效优于跟随者企业回收时的环境绩效; 当这一比值很小, 满足 $0 < i'_p + i'_u + i_c \leq (i_p + i_u + i_d)(1 - L_3)$, 闭环供应链的环境绩效优于正向供应链, 并且跟随者企业回收时的环境绩效优于领导者企业回收时的环境绩效.

3.3 最优回收方式选择

以系统经济绩效和环境绩效均有所改善作为企业实施闭环供应链的前提条件, 分析企业实施闭环供应链前后系统经济绩效和环境绩效的变化, 可以得出企业实施闭环供应链的条件以及不同渠道权力结构下的最优回收方式, 结论如下.

定理 12 i) 当 $i'_p + i'_u + i_c > (i_p + i_u + i_d)(1 - L_1)$ 时, 制造商不实施闭环供应链. ii) 当 $(i_p + i_u + i_d)(1 - L_2) < i'_p + i'_u + i_c \leq (i_p + i_u + i_d)(1 - L_1)$ 时, 领导者企业回收废旧品时的经济和环境绩效均优于正向供应链, 制造商实施闭环供应链, 由领导者企业回收废旧品, 环境绩效达到最优而经济绩效次优, 即 $\Pi_t^{mm*} = \Pi_t^{rr*} < \Pi_t^{rm*} = \Pi_t^{mr*}$, $E_t^{rr*} = E_t^{mm*} \leq E_t^{m*} = E_t^{r*} < E_t^{mr*} = E_t^{rm*}$. iii) 当 $(i_p + i_u + i_d)(1 - L_3) < i'_p + i'_u + i_c \leq (i_p + i_u + i_d)(1 - L_2)$ 时, 领导者企业回收和跟随者企业回收的经济和环境绩效均优于正向供应链, 制造商实施闭环供应链, 由领导者企业回收废旧品, 环境绩效达到最优而经济绩效次优, 由跟随者企业回收废旧品, 经济绩效最优而环境绩效次优, 即 $\Pi_t^{mm*} = \Pi_t^{rr*} < \Pi_t^{rm*} = \Pi_t^{mr*}$, $E_t^{rr*} = E_t^{mm*} < E_t^{mr*} = E_t^{rm*} \leq E_t^{m*} = E_t^{r*}$. iv) 当 $0 < i'_p + i'_u + i_c \leq (i_p + i_u + i_d)(1 - L_3)$ 时, 领导者企业回收和跟随者企业回收的经济和环境绩效均优于正向供应链, 制造商实施闭环供应链, 并且由跟随者企业回收废旧品经济和环境绩效都实现最优.

从定理 11 可知, 闭环供应链的系统利润优于正向供应链的系统利润, 但是只有在特定条件下闭环供应链的环境绩效才优于正向供应链的环境绩效. 制造商是否实施闭环供应链以及应该选择什么回收方式取决于产品生命周期各环节的环境影响. $E_t^k - E_t^{ij} = (i_p + i_u + i_d)[q^k - (1 - \tau^{ij})q^{ij}] - (i'_p + i'_u + i_c)\tau^{ij}q^{ij}$, 当 $\frac{i'_p+i'_u+i_c}{i_p+i_u+i_d} = \frac{q^k}{\tau^{ij}q^{ij}} - 1 + \frac{1}{\tau^{ij}}$ 时, $E_t^k = E_t^{ij}$. 当 $\frac{i'_p+i'_u+i_c}{i_p+i_u+i_d}$ 足够大时, $E_t^k < E_t^{ij}$, 实施闭环供应链的经济绩效得到改善而环境绩效变差, 假设企业不以牺牲环境为代价追求经济增长, 此时制造商选择不实施闭环供应链. 当 $\frac{i'_p+i'_u+i_c}{i_p+i_u+i_d}$ 逐渐缩小, 实施闭环供应链的环境优越性开始体现, 由于领导者企业回收时的需求和回收率均低于零售商回收, 所以当 $\frac{i'_p+i'_u+i_c}{i_p+i_u+i_d}$ 适中时, 制造商实施闭环供应链, 并且由领导者企业回收废旧品环境绩效更优. 当 $\frac{i'_p+i'_u+i_c}{i_p+i_u+i_d}$ 很小时, 制造商实施闭环供应链, 并且由跟随者企业回收废旧品, 环境绩效更优. 这一定理说明实施闭环供应链可以改善经济绩效, 但未必能够提高环境绩效, 只有产品全生命周期各环节的单位

环境影响满足一定条件,实施闭环供应链才能实现经济和环境双赢。

4 结束语

本文研究了回收方式和渠道权力结构对闭环供应链经济绩效和环境绩效的影响,以及企业实施闭环供应链的条件和回收方式的选择问题。针对单个制造商和单个零售商组成的供应链,考虑两种回收方式和两种渠道权力结构,首先分别得出正向和闭环供应链的模型均衡解,并根据利润最大化决策确定系统环境绩效,然后对闭环供应链四种模型的均衡解以及正向和闭环供应链的系统经济和环境绩效进行对比分析。研究结果表明:相同渠道权力结构下,与领导者企业回收废旧品相比,跟随者企业回收时的回收率更高;闭环供应链的系统利润总是优于正向供应链的系统利润,但只有在特定条件下,实施闭环供应链才能实现经济和环境的双赢。本文在既定假设条件下进行分析,具有一定局限性。首先,本研究没有考虑政府对企业的干预,但在现实决策中,政府的奖惩机制影响企业实施闭环供应链的积极性;其次,本研究是在产品单周期使用寿命背景下展开的,考虑产品多周期使用寿命的多阶段决策问题值得探讨。

参考文献:

- [1] Choi T M, Li Y, Xu L. Channel leadership, performance and coordination in closed loop supply chains. *International Journal of Production Economics*, 2013, 146(1): 371–380.
- [2] Yenipazarli A. Managing new and remanufactured products to mitigate environmental damage under emissions regulation. *European Journal of Operational Research*, 2016, 249(1): 117–130.
- [3] Pazoki M, Zaccour G. A mechanism to promote product recovery and environmental performance. *European Journal of Operational Research*, 2019, 274(2): 601–614.
- [4] Zhang F, Zhang R. Trade-in remanufacturing, customer purchasing behavior, and government policy. *Manufacturing & Service Operations Management*, 2018, 20(4): 601–616.
- [5] Xiong Y, Zhao Q, Zhou Y. Manufacturer-remanufacturing vs supplier-remanufacturing in a closed-loop supply chain. *International Journal of Production Economics*, 2016, 176: 21–28.
- [6] 程晋石, 李帮义, 龚本刚, 等. 考虑再制造的技术许可交易组合选择. *系统工程学报*, 2018, 33(4): 121–134.
Cheng J S, Li B Y, Gong B G, et al. Trading portfolios selection of technology licensing with remanufacturing. *Journal of Systems Engineering*, 2018, 33(4): 121–134. (in Chinese)
- [7] Han X, Wu H, Yang Q, et al. Collection channel and production decisions in a closed-loop supply chain with remanufacturing cost disruption. *International Journal of Production Research*, 2017, 55(4): 1147–1167.
- [8] Liu Z, Chen J, Diallo C. Optimal production and pricing strategies for a remanufacturing firm. *International Journal of Production Economics*, 2018, 204: 290–315.
- [9] De Giovanni P, Zaccour G. A two-period game of a closed-loop supply chain. *European Journal of Operational Research*, 2014, 232(1): 22–40.
- [10] Savaskan R C, Bhattacharya S, Van Wassenhove L N. Closed-loop supply chain models with product remanufacturing. *Management Science*, 2004, 50(2): 239–252.
- [11] Savaskan R C, Van Wassenhove L N. Reverse channel design: The case of competing retailers. *Management Science*, 2006, 52(1): 1–14.
- [12] 卢荣花, 李 南. 电子产品闭环供应链回收渠道选择研究. *系统工程理论与实践*, 2016, 36(7): 1687–1695.
Lu R H, Li N. Take-back channel selection of closed-loop supply chain for an electronic product. *Systems Engineering: Theory & Practice*, 2016, 36(7): 1687–1695. (in Chinese)
- [13] Chuang C H, Wang C X, Zhao Y. Closed-loop supply chain models for a high-tech product under alternative reverse channel and collection cost structures. *International Journal of Production Economics*, 2014, 156(5): 108–123.
- [14] 李春发, 冯立攀. 考虑消费者偏好的 WEEE 双回收渠道设计策略研究. *系统工程学报*, 2016, 31(4): 494–503.
Li C F, Feng L P. Strategic analysis of dual-recycling channel design for WEEE considering customer preferences. *Journal of Systems Engineering*, 2016, 31(4): 494–503. (in Chinese)

- [15] 李晓静, 艾兴政, 唐小我. 竞争性供应链下再制造产品的回收渠道研究. 管理工程学报, 2016, 30(3): 90–98.
Li X J, Ai X Z, Tang X W. Research on collecting strategies in the closed-loop supply chain with chain to chain competition. Journal of Industrial Engineering & Engineering Management, 2016, 30(3): 90–98. (in Chinese)
- [16] Wang N, He Q, Jiang B. Hybrid closed-loop supply chains with competition in recycling and product markets. International Journal of Production Economics, 2019, 217: 246–258.
- [17] He Q, Wang N, Yang Z, et al. Competitive collection under channel inconvenience in closed-loop supply chain. European Journal of Operational Research, 2019, 275(1): 155–166.
- [18] Pan K, Lai K K, Leung S C H, et al. Revenue-sharing versus wholesale price mechanisms under different channel power structures. European Journal of Operational Research, 2010, 203(2): 532–538.
- [19] Chen X, Wang X. Free or bundled: Channel selection decisions under different power structures. Omega: The International Journal of Management Science, 2015, 53: 11–20.
- [20] Chen X, Wang X, Jiang X. The impact of power structure on the retail service supply chain with an O2O mixed channel. Journal of the Operational Research Society, 2016, 67(2): 294–301.
- [21] Xue W, Demirag O C, Niu B. Supply chain performance and consumer surplus under alternative structures of channel dominance. European Journal of Operational Research, 2014, 239(1): 130–145.
- [22] Wang W, 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.
- [23] Gao J, Han H, Hou L, et al. Pricing and effort decisions in a closed-loop supply chain under different channel power structures. Journal of Cleaner Production, 2016, 112: 2043–2057.
- [24] Zheng B, Yang C, Yang J, et al. Dual-channel closed loop supply chains: Forward channel competition, power structures and coordination. International Journal of Production Research, 2017, 55(12): 3510–3527.
- [25] 易余胤. 具竞争零售商的再制造闭环供应链模型研究. 管理科学学报, 2009, 12(6): 45–54.
Yi Y Y. Closed-loop supply chain game models with product remanufacturing in a duopoly retailer channel. Journal of Management Sciences in China, 2009, 12(6): 45–54. (in Chinese)
- [26] 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)
- [27] Kovach J J, Atasu A, Banerjee S. Salesforce incentives and remanufacturing. Production and Operations Management, 2018, 27(3): 516–530.
- [28] Miao Z, Fu K, Xia Z, et al. Models for closed-loop supply chain with trade-ins. Omega: The International Journal of Management Science, 2017, 66: 308–326.
- [29] 卢荣花, 李 南. 零售商竞争环境下两周期闭环供应链回收渠道选择研究. 系统管理学报, 2017, 26(6): 146–153.
Lu R H, Li N. Take-back channel selection of a two-period closed-loop supply chain in retailer competing settings. Journal of Systems & Management, 2017, 26(6): 146–153. (in Chinese)
- [30] Zhang F, Zhang R. Trade-in remanufacturing, customer purchasing behavior, and government policy. Manufacturing & Service Operations Management, 2018, 20(4): 601–616.
- [31] 李新然, 左宏伟. 政府双重干预对双销售渠道闭环供应链的影响. 系统工程理论与实践, 2017, 37(10): 2600–2610.
Li X R, Zuo H W. Impacts of government double intervention on dual-sale-channel closed-loop supply chain. Systems Engineering: Theory & Practice, 2017, 37(10): 2600–2610. (in Chinese)
- [32] Genc T S, De Giovanni P. Optimal return and rebate mechanism in a closed-loop supply chain game. European Journal of Operational Research, 2018, 269(2): 661–681.
- [33] Ma Z, Zhang N, Dai Y, et al. Managing channel profits of different cooperative models in closed-loop supply chains. Omega: The International Journal of Management Science, 2016, 59: 251–262.
- [34] Agrawal V V, Ferguson M, Toktay L B, et al. Is leasing greener than selling. Management Science, 2012, 58(3): 523–533.
- [35] Agrawal V V, Bellos I. The potential of servicizing as a green business model. Management Science, 2016, 63(5): 1545–1562.
- [36] Agrawal V V, Ulku S. The role of modular upgradability as a green design strategy. Manufacturing & Service Operations Management, 2013, 15(4): 610–648.

作者简介:

张维月 (1990—), 女, 河北沧州人, 博士生, 研究方向: 可持续运营管理, Email: zwyue@mail.nwpu.edu.cn;

刘晨光 (1974—), 男, 河南商丘人, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向: 可持续运营管理, Email: liuc@nwpu.edu.cn;

李芳(1990—),女,陕西西安人,硕士,研究方向:可持续运营管理,Email: lifang_a@mindray.com;

李琳(1990—),女,河北邢台人,博士生,研究方向:可持续运营管理,Email: llin@mail.nwpu.edu.cn.

附录

引理2证明

Π_r^{mm} 关于 u^{mm} 的二阶导数 $\frac{d^2 \Pi_r^{mm}}{d(u^{mm})^2} = -2\beta < 0$, Π_r^{mm} 是关于 u^{mm} 的严格凹函数,则价格增量关于批发价格的反应函数为 $u^{mm}(w^{mm}) = \frac{\alpha - \beta w^{mm}}{2\beta}$,代入 Π_m^{mm} 可得关于 w^{mm} 和 τ^{mm} 的海塞矩阵为

$$\mathbf{H} = \begin{pmatrix} -\beta & -\frac{\beta(\Delta + c_d)}{2} \\ -\frac{\beta(\Delta + c_d)}{2} & -\varepsilon \end{pmatrix},$$

其中 $H_{11} = -\beta < 0$,为保证海塞矩阵为负定阵,须有 $|\mathbf{H}| = \beta\varepsilon - \frac{\beta^2(\Delta + c_d)^2}{4} > 0$,即 $4\varepsilon > \beta(\Delta + c_d)^2$. 联立 $\frac{\partial \Pi_m^{mm}}{\partial w^{mm}} = 0$ 和 $\frac{\partial \Pi_m^{mm}}{\partial \tau^{mm}} = 0$,可得 w^{mm*} 和 τ^{mm*} . 证毕.

引理3证明

Π_m^{rm} 关于 w^{rm} 和 τ^{rm} 的海塞矩阵为

$$\mathbf{H} = \begin{pmatrix} -2\beta & -\beta(\Delta + c_d) \\ -\beta(\Delta + c_d) & -\varepsilon \end{pmatrix},$$

其中 $H_{11} = -2\beta < 0$,为保证海塞矩阵为负定阵,须有 $|\mathbf{H}| = 2\beta\varepsilon - \beta^2(\Delta + c_d)^2 > 0$,即 $2\varepsilon > \beta(\Delta + c_d)^2$. 联立 $\frac{\partial \Pi_m^{rm}}{\partial w^{rm}} = 0$ 和 $\frac{\partial \Pi_m^{rm}}{\partial \tau^{rm}} = 0$,可得 $w^{rm}(u^{rm}) = \frac{\varepsilon[\alpha - \beta(u^{rm} - c_m - c_d)] - \alpha\beta(\Delta + c_d)^2 + u^{rm}\beta^2(\Delta + c_d)^2}{\beta[2\varepsilon - \beta(\Delta + c_d)^2]}$, $\tau^{rm}(u^{rm}) = \frac{(\Delta + c_d)[\alpha - \beta(u^{rm} + c_m + c_d)]}{2\varepsilon - \beta(\Delta + c_d)^2}$,代入 Π_r^{rm} ,根据 $\frac{\partial^2 \Pi_r^{rm}}{\partial (u^{rm})^2} = \frac{-2\beta\varepsilon}{2\varepsilon - \beta\Delta^2\gamma^2} < 0$ 可知 Π_r^{rm} 是关于 u^{rm} 的凹函数,令一阶导数为0可得 u^{rm*} ,代入 $w^{rm}(u^{rm})$ 和 $\tau^{rm}(u^{rm})$ 可得 w^{rm*} 和 τ^{rm*} . 证毕.

引理4证明

Π_r^{mr} 关于 u^{mr} 和 τ^{mr} 的海塞矩阵为

$$\mathbf{H} = \begin{pmatrix} -2\beta & -\beta\kappa \\ -\beta\kappa & -\varepsilon \end{pmatrix},$$

其中 $H_{11} = -2\beta < 0$,为保证海塞矩阵为负定阵,须有 $|\mathbf{H}| = 2\beta\varepsilon - \beta^2\kappa^2 > 0$,即 $2\varepsilon > \beta\kappa^2$. 联立 $\frac{\partial \Pi_r^{mr}}{\partial u^{mr}} = 0$ 和 $\frac{\partial \Pi_r^{mr}}{\partial \tau^{mr}} = 0$,可得 $u^{mr}(w^{mr}) = \frac{(\alpha - \beta w^{mr})(\varepsilon - \beta\kappa^2)}{\beta(2\varepsilon - \beta\kappa^2)}$, $\tau^{mr}(w^{mr}) = \frac{\kappa(\alpha - \beta w^{mr})}{2\varepsilon - \beta\kappa^2}$,代入 Π_m^{mr} ,当 κ 一定时, $\frac{\partial^2 \Pi_m^{mr}}{\partial (w^{mr})^2} = \frac{-2\beta\varepsilon[2\varepsilon - \beta\kappa(\Delta + c_d)]}{(2\varepsilon - \beta\kappa^2)^2}$,为保证 Π_m^{mr} 是关于 w^{mr} 的凹函数,假设 $2\varepsilon > \beta\kappa(\Delta + c_d)$. 令一阶导数为0可得 $w^{mr*} = \frac{2\varepsilon(\alpha + \beta c_m + \beta c_d) + \beta(\alpha - \beta c_m - \beta c_d)\kappa^2 - 2\alpha\beta\kappa(\Delta + c_d)}{2\beta[2\varepsilon - \beta\kappa(\Delta + c_d)]}$,从而 $u^{mr*} = \frac{(\alpha - \beta c_m - \beta c_d)(\varepsilon - \beta\kappa^2)}{2\beta[2\varepsilon - \beta\kappa(\Delta + c_d)]}$, $\tau^{mr*} = \frac{\kappa(\alpha - \beta c_m - \beta c_d)}{2[2\varepsilon - \beta\kappa(\Delta + c_d)]}$,代入求得制造商利润 $\Pi_m^{mr*} = \frac{\varepsilon(\alpha - \beta c_m - \beta c_d)^2}{4\beta[2\varepsilon - \beta\kappa(\Delta + c_d)]}$,易知 Π_m^{mr*} 是关于 κ 的递增函数,根据 $0 < \kappa \leq (\Delta + c_d)$ 可知,当 $\kappa = \Delta + c_d$ 时, Π_m^{mr*} 取得最大值. 证毕.

引理5证明

Π_m^{rr} 关于 w^{rr} 的二阶导数 $\frac{d^2 \Pi_m^{rr}}{d(w^{rr})^2} = -2\beta < 0$,令 $\frac{d \Pi_m^{rr}}{d w^{rr}} = 0$ 可得 w^{rr} 关于 u^{rr} 和 τ^{rr} 的反应函数 $w^{rr}(u^{rr}, \tau^{rr}) = \frac{\alpha - \beta[u^{rr} - c_m - c_d + (\Delta - \kappa + c_d)\tau^{rr}]}{2\beta}$,代入 Π_r^{rr} 求关于 τ^{rr} 和 u^{rr} 的二阶偏导数可得 Π_r^{rr} 的海塞矩阵为

$$\mathbf{H} = \begin{pmatrix} -\beta & \frac{\beta(\Delta - 2\kappa + c_d)}{2} \\ \frac{\beta(\Delta - 2\kappa + c_d)}{2} & -\varepsilon + \beta\kappa(\Delta - \kappa + c_d) \end{pmatrix}.$$

为保证海塞矩阵为负定阵,须有 $|\mathbf{H}| = \frac{\beta[4\varepsilon - 4\beta\kappa(\Delta - \kappa + c_d) - \beta(\Delta - 2\kappa + c_d)^2]}{4} > 0$,即 $4\varepsilon > 4\beta\kappa(\Delta - \kappa + c_d) + \beta(\Delta - 2\kappa + c_d)^2$. 联立 $\frac{\partial \Pi_r^{rr}}{\partial u^{rr}} = 0$ 和 $\frac{\partial \Pi_r^{rr}}{\partial \tau^{rr}} = 0$ 可得 $u^{rr*} = \frac{(\alpha - \beta c_m - \beta c_d)[2\varepsilon + \beta\kappa(\Delta - 2\kappa + c_d)]}{\beta[4\varepsilon - \beta(\Delta - 2\kappa + c_d)^2]}$, $\tau^{rr*} = \frac{(\Delta + c_d)(\alpha - \beta c_m - \beta c_d)}{4\varepsilon - \beta(\Delta - 2\kappa + c_d)^2}$,代入 $w^{rr}(u^{rr}, \tau^{rr})$ 可得 $w^{rr*} = \frac{(\alpha + 3\beta c_m + 3\beta c_d)[2\varepsilon + \beta\kappa(\Delta - 2\kappa + c_d)] - \beta(\Delta + c_d)[2\alpha(\Delta + c_d) - \kappa(3\alpha + \beta c_m + \beta c_d)]}{2\beta[4\varepsilon - \beta(\Delta - 2\kappa + c_d)^2]}$,进而求得零售商利润为 $\Pi_r^{rr*} = \frac{4(\alpha - \beta c_m - \beta c_d)^2[\varepsilon + \beta\kappa(\Delta - \kappa + c_d)]^2 - \beta\varepsilon(\Delta + c_d)^2(\alpha - \beta c_m - \beta c_d)^2}{2\beta[4\varepsilon - \beta(\Delta - 2\kappa + c_d)^2]^2}$. Π_r^{rr*} 关于 κ 的一阶导数为 $\frac{\partial \Pi_r^{rr*}}{\partial \kappa} = \frac{-4(\alpha - \beta c_m - \beta c_d)^2(\Delta - 2\kappa + c_d)[\varepsilon + \beta\kappa(\Delta - \kappa + c_d)][\beta(\Delta - 2\kappa + c_d)^2 + \beta\kappa(\Delta - \kappa + c_d)] + \beta\varepsilon(\Delta + c_d)^2}{[4\varepsilon - \beta(\Delta - 2\kappa + c_d)^2]^3}$,当 $0 < \kappa < \frac{\Delta + c_d}{2}$ 时, $\frac{\partial \Pi_r^{rr*}}{\partial \kappa} < 0$,当 $\frac{\Delta + c_d}{2} < \kappa \leq \Delta + c_d$ 时, $\frac{\partial \Pi_r^{rr*}}{\partial \kappa} > 0$,那么可知,当 $\kappa = \frac{\Delta + c_d}{2}$ 时, Π_r^{rr*} 取最小值,当 $\kappa = \Delta + c_d$ 时, Π_r^{rr*} 取最大值. 证毕.