

控制与决策

Control and Decision

考虑权力结构与股权合作的低碳闭环供应链生产决策及协调

孙嘉轶, 杨露, 张颖, 姚锋敏

引用本文:

孙嘉轶, 杨露, 张颖, 姚锋敏. 考虑权力结构与股权合作的低碳闭环供应链生产决策及协调[J]. *控制与决策*, 2024, 39(2): 669–679.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2022.0270>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

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>

信息非对称下考虑制造商回收行为的闭环供应链协调

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

控制与决策. 2021, 36(7): 1723–1731 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1657>

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>

考虑权力结构与股权合作的低碳闭环供应链 生产决策及协调

孙嘉轶[†], 杨露, 张颖, 姚锋敏

(哈尔滨理工大学 经济与管理学院, 哈尔滨 150080)

摘要: 低碳时代传统制造业的成本构成以及盈利模式已被彻底颠覆, 考虑再制造及碳减排的闭环供应链生产决策及协调优化值得关注. 在 3 种渠道权力结构下, 构建零售商持股制造商减排投资的闭环供应链决策模型, 分析权力结构与股权合作对闭环供应链生产决策及企业利润的影响, 探讨股权合作与两部定价契约的协调效果. 研究发现, 不同权力结构的闭环供应链需选择合适的持股比例, 零售商主导下更高的持股比例产生更高的回收率、碳减排量及市场需求, 而 Nash 博弈下则相反. 有主导者的权力结构中, 零售商持股比例的增加能够提高主导企业的利润; 无主导者的权力结构中, 企业利润的增减受持股比例与消费者低碳偏好的共同影响. 无论何种权力结构, 股权合作仅能实现闭环供应链的部分协调, 通过两部定价契约可实现完美协调.

关键词: 低碳闭环供应链; 权力结构; 减排投资; 股权合作; 两部定价; 生产决策

中图分类号: F224; F273

文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2022.0270

引用格式: 孙嘉轶, 杨露, 张颖, 等. 考虑权力结构与股权合作的低碳闭环供应链生产决策及协调 [J]. 控制与决策, 2024, 39(2): 669-679.

Production decision and coordination of low-carbon closed-loop supply chain considering power structures and equity cooperation

SUN Jia-yi[†], YANG Lu, ZHANG Ying, YAO Feng-min

(School of Economics and Management, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080, China)

Abstract: In the low carbon economy, the cost structure and profit model of traditional manufacturing industry have been completely overturned. The production decision and coordination of the closed-loop supply chain with remanufacturing and carbon emission reduction deserve attention. Under three different channel power structures, closed-loop supply chain decision models with retailer holding manufacturer's emission reduction investment are constructed. Then the effects of power structures and equity cooperation on the production decision and enterprise profit are analyzed. Finally, the coordination effect of equity cooperation and two-part tariff are discussed. It is shown that the closed-loop supply chain with different power structure needs to choose the appropriate shareholding ratio. Under the dominant retailer power structure, the higher shareholding ratio produces higher recovery rate, carbon emission reduction and market demand, while in the Nash game, it is just the opposite. In the power structures with a leader, the increase of retailer's shareholding ratio can improve the profit of the leading enterprise, while in the power structure without a leader, the increase or decrease of enterprise profits is affected by both shareholding ratio and consumers' low-carbon preference. No matter what power structures, equity cooperation can only partially coordinate the closed-loop supply chain, and perfect coordination can be achieved through two-part tariff contracts.

Keywords: low-carbon closed-loop supply chain; power structures; emission reduction investment; equity cooperation; two-part tariff; production decision

0 引言

随着经济发展与资源环境约束之间的矛盾日

益突显, 世界各国都在积极探寻低碳可持续发展道路. 我国“十四五”规划纲要明确提出推动绿色发展,

收稿日期: 2022-02-20; 录用日期: 2022-07-17.

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目(71701056); 中央支持地方高校改革发展资金人才培养项目(2021); 黑龙江省哲学社会科学研究规划项目(21GLB065).

责任编辑: 霍宝锋.

[†]通讯作者. E-mail: sjy_sjx@163.com.

促进人与自然和谐共生的目标,健全并实施有利于节能环保和资源综合利用的政策.国家大力发展再制造工程是实现环保终极目标的必然选择.与此同时,消费者的环保意识逐年提高,据调查,68%的消费者因企业履行环保、低碳等环境责任方面的声誉而购买其产品或服务,94%的中国大陆受访者表示愿意以更高的价格购买环保产品^[1].在此背景下,相关的政策法规以及消费终端的需求,迫使企业实施低碳节能循环生产.

闭环供应链中往往由制造企业实施碳减排,生产低碳产品,如苹果、丰田等.由于从事低碳生产的高投入以及技术溢出效应造成的下游企业“搭便车”现象,制造企业实施碳减排的动力始终不足.与此同时,随着供应链的发展与扩张,逐渐涌现出苏宁、京东等拥有更多话语权的零售商,制造商主导的传统供应链权力结构也逐渐演化出零售商主导,以及参与者具有均衡权力结构的形式.股权合作有利于闭环供应链形成战略联盟,共享利润并分担风险.综上所述,本文致力于解决如下问题:

1) 如何破解制造商从事低碳生产的高投入及“搭便车”困境;

2) 低碳闭环供应链中不同权力结构是否对其成员的股权策略产生影响;

3) 不同权力结构及股权合作下,低碳闭环供应链如何消除“双重边际效应”,实现系统完美协调.

与本文相关的研究主要分为3个方面:供应链中的权力结构、碳减排以及股权合作与契约协调.权力结构的研究一直是供应链研究领域的经典问题,不同权力结构的闭环供应链决策及协调研究取得了丰硕的成果. Choi等^[2]探讨了渠道权力结构对第三方回收闭环供应链定价及回收决策的影响; Zheng等^[3]探讨了前向渠道竞争和权力结构对双渠道闭环供应链的影响; Yang等^[4]在3种渠道权力结构下,研究了消费者预期后悔对原始制造商再制造策略的影响; 闻卉等^[5]研究了3种权力结构下双渠道闭环供应链的定价策略,并设计了组合协调契约; 王竟竟等^[6]分析了风险规避程度对不同权力结构与联盟策略下闭环供应链定价决策及期望收益的影响; 姚锋敏等^[7]研究了主导者或跟随者承担CSR对不同权力结构闭环供应链定价决策的影响. 上述研究尚未关注不同权力结构对低碳闭环供应链回收及碳减排决策的影响.

在供应链碳减排研究中,一些学者关注了碳税政策对供应链减排决策的影响, Heydari等^[8]分析了碳税政策对制造商制造/再制造决策的影响; Dou等^[9]

考虑了新品及再制品碳排放差异,在碳税政策下研究了闭环供应链的渠道选择问题; 王娜等^[10]在再制造专利保护政策下,分析了碳税及碳减排对制造及再制造决策的影响. 在碳限额与交易研究方面, Chai等^[11]研究发现无论在普通市场还是绿色市场中,碳限额与交易机制都是有价值的; Wang等^[12]在碳交易的背景下,比较了3种回收方式的优劣; Xing等^[13]研究了碳权交易价格及消费者低碳偏好对闭环供应链成员决策的影响. 在碳补贴政策实施效果的研究中, Li等^[14]对比了绿色技术投资补贴和减排量补贴两种方式对供应链碳减排总量及绿色营销策略的影响. 以上研究更多关注了不同碳规制政策对供应链成员决策的影响,忽视了企业自主减排的意愿以及面临的困境,缺乏对供应链,尤其是考虑回收再制造的闭环供应链内部激励机制的研究.

制造企业实施碳减排有利于提高供应链的整体绩效,但低碳生产的高成本及“搭便车”等问题,降低了其减排的积极性. 以往的研究多是通过合同契约增强企业间的联系,如两部定价契约^[15]、数量折扣契约^[16]以及收益共享-成本共担契约^[17]等,而供应链间企业的股权合作同样可以加强上下游企业之间的联系,实现收益共享成本共担,促进供应链协调并形成企业战略联盟. 在单向股权合作研究中, Fu等^[18]与王旭坪等^[19]关注了上游企业持股下游企业的协调效果. 在下游企业持股上游企业方面, 刘名武等^[20]研究发现零售商制定合适的持股比例,可以消除持股前零售商的“搭便车”现象,实现供应链的完美协调. 樊文平等^[21]在两种合同下,探讨了纵向持股对供应链中企业决策及利润的影响. 在双向股权合作研究方面, Fu等^[22]在需求随机情形下,分别研究了交叉持股对“推式”及“拉式”供应链价格及产量决策的影响. 夏良杰等^[23]在具有碳限额交易的供应链中研究了交叉持股对企业决策及利润的影响,并说明了交叉持股的协调效果.

综上所述,学者们在供应链的权力结构、碳规制及协调等方面取得了丰硕的研究成果,然而尚缺少在低碳循环经济背景下,股权合作对不同权力结构闭环供应链决策及协调影响的研究. 本文分别构建集中式决策模型、3种不同渠道权力结构下的分散式决策模型,分析持股比例、消费者碳减排敏感系数对企业最优决策及利润的影响,探讨股权合作对低碳闭环供应链的协调效果,并提出两部定价契约. 以上研究能够对闭环供应链成员制定回收、减排及定价策略以及企业间的股权合作战略提供决策参考.

1 问题描述及假设

本文考虑具有一个制造商和一个零售商的闭环供应链,且二者之间信息是完全对称的. 制造商负责新品与再制品的生产以及废旧产品的回收,且随着消费者低碳环保意识的提高,制造商实施碳减排. 实践中,2020年特斯拉实现二氧化碳当量减排500万吨,报废电池实现百分百回收再利用^[24]. 零售商负责产品的销售,且假设新品与再制品在功能及外观上无差异,消费者对其接受程度是一致的^[7]. 闭环供应链中产品的市场需求由销售价格和制造商碳减排量共同决定,参照文献^[23],零售商的市场需求函数为

$$D = a - bp + \theta e. \quad (1)$$

其中: a 表示市场容量, p 表示产品的单位销售价格, e 表示单位产品的碳减排量, $b(b > 0)$ 表示消费者对销售价格的敏感系数, $\theta(\theta > 0)$ 表示消费者对碳减排的敏感系数,假设 $a > bc$. 其他相关符号及说明如表1所示.

表1 符号说明

符号	定义及假设
w	产品的单位批发价格, $w > 0$
m	零售商销售单位产品的利润, $m = p - w$
c_n	新品的单位生产成本, $c_n > 0$
c_r	再制品的单位生产成本, $c_r < c_n$
Δ	再制品的单位节约成本, $\Delta = c_n - c_r > 0$
A	废旧产品的单位转移价格, $A < \Delta$
τ	废旧产品的回收率, $0 \leq \tau \leq 1$
λ	零售商持股比例, $0 < \lambda < 1$
$I(e)$	碳减排的投资成本 ^[20] , $I(e) = \frac{1}{2}ke^2$, $k(k > 0)$ 代表碳减排难度系数
$C(\tau)$	回收废旧产品的固定投资成本 ^[7] , $C(\tau) = \delta\tau^2$, $\delta(\delta > 0)$ 代表回收难度系数
Π_X^Y	X 在 Y 模型下的利润, $X = \{m, r, sc\}$ 分别表示制造商、零售商和供应链, $Y = \{C, M, R, N, TM, TR, TN\}$ 分别表示集中式、制造商主导、零售商主导、Nash博弈以及3个协调模型

2 不同权力结构下低碳闭环供应链决策模型构建

当制造商实施碳减排时,企业追求自身利润的最大化,则碳减排制造商及零售商的利润函数分别为

$$\begin{aligned} \Pi_m(\tau, e, w) = & (w - c_n + \tau\Delta)D - A\tau D - \delta\tau^2 - \frac{1}{2}ke^2, \quad (2) \end{aligned}$$

$$\Pi_r(p) = (p - w)D. \quad (3)$$

2.1 集中式决策模型(C模型)

制造商和零售商以闭环供应链整体利润最大化为目标,由式(2)及(3)可知,此时低碳闭环供应链的

利润函数为

$$\begin{aligned} \Pi_{sc}^C(\tau, e, p) = & (p - c_n + \tau\Delta)D - A\tau D - \delta\tau^2 - \frac{1}{2}ke^2. \quad (4) \end{aligned}$$

定理1 在集中式决策模型中,当 $k > \frac{8\delta(1-\lambda) - 4b\lambda\Delta(\lambda-1)(\Delta(\lambda-1) + A)}{(\Delta(\lambda-1) + A)^2\theta^2}$ 时,废旧产品的最优回收率、产品的最优碳减排量、最优销售价格及最优需求量分别为

$$\begin{aligned} \tau^{C*} &= \frac{bk(a - bc_n)(A - \Delta)}{kb(b(A - \Delta)^2 - 4\delta) + 2\delta\theta^2}, \\ e^{C*} &= \frac{-2\delta\theta(a - bc_n)}{kb(b(A - \Delta)^2 - 4\delta) + 2\delta\theta^2}, \\ p^{C*} &= \frac{k(b(a(A - \Delta)^2 - 2\delta c_n) - 2a\delta) + 2\delta c_n\theta^2}{kb(b(A - \Delta)^2 - 4\delta) + 2\delta\theta^2}, \\ D^{C*} &= \frac{-2\delta bk(a - bc_n)}{kb(b(A - \Delta)^2 - 4\delta) + 2\delta\theta^2}. \end{aligned}$$

低碳闭环供应链利润为

$$\Pi_{sc}^{C*} = \frac{k\delta(a - bc_n)^2}{kb(4\delta - b(A - \Delta)^2) - 2\delta\theta^2}.$$

证明 采用逆向归纳法求解,将式(1)代入(4),求得 Π_{sc}^C 关于 τ, e 和 p 的二阶偏导数,可得海塞矩阵

$$H^C = \begin{bmatrix} -2\delta & \theta(\Delta - A) & \theta \\ \theta(\Delta - A) & -k & b(A - \Delta) \\ \theta & b(A - \Delta) & -2b \end{bmatrix}.$$

为保证海塞矩阵负定,需有

$$k > \frac{(\Delta(\lambda - 1) + A)^2\theta^2}{8\delta(1 - \lambda) - 4b\lambda\Delta(\lambda - 1)(\Delta(\lambda - 1) + A)}.$$

此时, Π_{sc}^C 是关于 τ, e, p 的严格凹函数,联立求解 $\frac{\partial \Pi_{sc}^C}{\partial \tau} = 0, \frac{\partial \Pi_{sc}^C}{\partial e} = 0, \frac{\partial \Pi_{sc}^C}{\partial p} = 0$,可得 $\tau^{C*}, e^{C*}, p^{C*}$,将 p^{C*} 和 e^{C*} 代入 $D = a - bp + \theta e$,求得产品的最优需求量 D^{C*} .最后,将 $\tau^{C*}, e^{C*}, p^{C*}$ 和 D^{C*} 代入式(4),求得 Π_{sc}^{C*} . □

2.2 制造商主导Stackelberg博弈模型(M模型)

在制造商主导的低碳闭环供应链中,零售商以持股比例 λ 分担制造商 $\frac{1}{2}\lambda ke^2$ 的减排投资成本,并分享制造商 $\lambda D(w - c_n + \tau\Delta)$ 的收益. 决策顺序如下: 1) 制造商依据利润最大化原则决策最优批发价格 w 、最优废旧产品的最优回收率 τ 及产品的最优减排量 e ; 2) 追求总利润最大的零售商根据制造商的决策制定最优的产品销售价格 p . 制造商和零售商的利润函数分别为

$$\begin{aligned} \Pi_m^M(\tau, e, w) = & (1 - \lambda)(w - c_n + \tau\Delta)D - \\ & A\tau D - \delta\tau^2 - \frac{1}{2}(1 - \lambda)ke^2. \quad (5) \end{aligned}$$

$$\Pi_r^M(p) = (p - w)D + \lambda(w - c_n +$$

$$\tau\Delta)D - \frac{1}{2}\lambda ke^2. \quad (6)$$

定理2 在制造商主导的低碳闭环供应链中,当 $k > \frac{2\delta\theta^2}{b(1-\lambda)(8\delta-b(A-\Delta)^2)}$ 时,产品的最优批发价格、废旧产品的最优回收率、最优碳减排量、最优销售价格及最优需求量分别为

$$w^{M*} = \frac{4ak\delta - 2c_n\delta\theta^2 + kb((\Delta-A)(a\Delta(\lambda-1) + Aa - Ab\lambda c_n) + 4c_n\delta(1-2\lambda))}{kb(\lambda-1)(b(A-\Delta)^2 - 8\delta) - 2\delta\theta^2},$$

$$\tau^{M*} = \frac{bk(\lambda-1)(a-bc_n)(A-\Delta)}{kb(\lambda-1)(b(A-\Delta)^2 - 8\delta) - 2\delta\theta^2},$$

$$e^{M*} = \frac{2\delta\theta(a-bc_n)}{kb(\lambda-1)(b(A-\Delta)^2 - 8\delta) - 2\delta\theta^2},$$

$$p^{M*} = \frac{k(\lambda-1)(b(a(A-\Delta)^2 - 2\delta c_n) - 6a\delta) - 2\delta c_n\theta^2}{kb(\lambda-1)(b(A-\Delta)^2 - 8\delta) - 2\delta\theta^2},$$

$$D^{M*} = \frac{2\delta bk(1-\lambda)(a-bc_n)}{kb(\lambda-1)(b(A-\Delta)^2 - 8\delta) - 2\delta\theta^2}.$$

制造商及零售商利润分别为

$$\Pi_m^{M*} = -\frac{\delta k(\lambda-1)(a-bc_n)^2}{kb(\lambda-1)(b(A-\Delta)^2 - 8\delta) - 2\delta\theta^2},$$

$$\Pi_r^{M*} = \frac{k\delta^2(a-bc_n)^2(4kb(\lambda-1)^2 - 2\lambda\theta^2)}{kb(\lambda-1)(b(A-\Delta)^2 - 8\delta) - 2\delta\theta^2}.$$

2.3 零售商主导 Stackelberg 博弈模型 (R 模型)

在零售商主导的低碳闭环供应链中,决策顺序如下:1)零售商依据利润最大化原则决策最优单位利润 m ;2)追求总利润最大的制造商根据零售商决策制定产品的最优批发价格 w 、最优废旧产品的回收率 τ 以及最优碳减排量 e ;3)通过 $p = w + m$ 及 $D = a - bp + \theta e$ 求得最优销售价格 p 及最优需求量 D . 与2.2节的处理方法相似,可得到如下均衡结果.

定理3 在零售商主导的低碳闭环供应链中,当 $k > \frac{2\delta\theta^2(\lambda-1)^2}{b(1-\lambda)(4\delta(\lambda-1) + b(\Delta(\lambda-1) + A^2))}$ 时,最优批发价格、废旧产品的最优回收率、最优碳减排量、最优销售价格及最优需求量分别为

$$w^{R*} = \frac{k(\lambda-1)(b(a(A-\Delta)^2 - 2c_n\delta) - 6a\delta) - 2\delta c_n\theta^2}{kb^2H(A-\Delta) + bG\delta(\lambda-2)} - \frac{(a-bc_n)(H(A\lambda-H) + G\delta(\lambda-1)^2)}{b(\lambda-1)(kb^2H(A-\Delta) + G\delta(\lambda-2))},$$

$$\tau^{R*} = \frac{Hkb(a-bc_n)}{2kb^2H(A-\Delta) + 2G\delta(\lambda-2)},$$

$$e^{R*} = \frac{\delta\theta(bc_n-a)}{kb^2H(A-\Delta) + G\delta(\lambda-2)},$$

$$p^{R*} = \frac{kb(\lambda-1)(a(A-\Delta)^2 - 2\delta c_n) - 2\delta c_n\theta^2}{kb^2H(A-\Delta) + bG\delta(\lambda-2)} +$$

$$\frac{6a\delta k(\lambda-1) - 2\delta c_n\theta^2}{G\delta b(\lambda-2)},$$

$$D^{R*} = \frac{\delta bk(bc_n-a)}{kb^2H(A-\Delta) + G\delta(\lambda-2)}.$$

制造商及零售商利润分别为

$$\Pi_m^{R*} = \frac{-k\delta(a-bc_n)^2(kb^2H^2 + 2G\delta(\lambda-1))}{4(G\delta(\lambda-2) + kb^2H(A-\Delta))^2},$$

$$\Pi_r^{R*} = \frac{-k\delta(a-bc_n)^2}{2G\delta(\lambda-2) + kb^2H(A-\Delta)}.$$

其中: $G = 2kb - \theta^2$, $H = (\lambda-1)\Delta + A$.

2.4 Nash 博弈模型 (N 模型)

在 Nash 博弈下的低碳闭环供应链中,制造商与零售商具有相同的市场地位,即无渠道主导者,二者同时做出最利于己方的决策,使得自身利益最大化,得到如下均衡结果.

定理4 在 Nash 博弈的低碳闭环供应链中,当 $k > \frac{2\delta\theta^2}{b(4\delta-b(A-\Delta)^2)}$ 时,产品的最优批发价格、废旧产品的最优回收率、最优碳减排量、最优销售价格及最优需求量分别为

$$w^{N*} = \frac{-k(a-bc_n)(\lambda AH + 2\delta(\lambda-1)^2)}{(\lambda-1)(kb^2(H(A-\Delta) + 2\delta(\lambda-3)) + 2\delta\theta^2)} + \frac{k(b(aH(A-\Delta) - 2\delta c_n) + 2a\delta(\lambda-2)) + 2\delta c_n\theta^2}{kb(H(A-\Delta) + 2\delta(\lambda-3)) + 2\delta\theta^2},$$

$$\tau^{N*} = \frac{bkH(a-bc_n)}{kb(H(A-\Delta) + 2\delta(\lambda-3)) + 2\delta\theta^2},$$

$$e^{N*} = \frac{2\delta\theta(bc_n-a)}{kb(bH(A-\Delta) + 2\delta(\lambda-3)) + 2\delta\theta^2},$$

$$p^{N*} = \frac{k(b(a(A-\Delta)H - 2\delta c_n) + 2a\delta(\lambda-2)) + 2\delta c_n\theta^2}{kb(H(A-\Delta) + 2\delta(\lambda-3)) + 2\delta\theta^2},$$

$$D^{N*} = \frac{2\delta bk(bc_n-a)}{Hkb^2(A-\Delta) + 2k\delta(\lambda-3) + 2\delta\theta^2}.$$

制造商及零售商利润分别为

$$\Pi_m^{N*} = \frac{-k\delta(a-bc_n)^2(Hkb^2 + 2G\delta(\lambda-1))}{(2k\delta(\lambda-3) + 2\delta\theta^2 + Hkb^2(A-\Delta))^2},$$

$$\Pi_r^{N*} = \frac{k\delta^2(a-bc_n)^2(4kb - 2\lambda\theta^2)}{(2k\delta(\lambda-3) + 2\delta\theta^2 + Hkb^2(A-\Delta))^2}.$$

3 不同权利结构下低碳闭环供应链均衡结果分析

性质1 1) $\frac{\partial \tau^{M*}}{\partial \lambda} > 0$; $\frac{\partial e^{M*}}{\partial \lambda} > 0$; $\frac{\partial p^{M*}}{\partial \lambda} > 0$; $\frac{\partial D^{M*}}{\partial \lambda} > 0$; $\frac{\partial \Pi_m^{M*}}{\partial \lambda} > 0$; 当 $0 < \lambda < \lambda_1$ 时, $\frac{\partial \Pi_r^{M*}}{\partial \lambda} > 0$, 反之 $\frac{\partial \Pi_r^{M*}}{\partial \lambda} \leq 0$.

2) $\frac{\partial \tau^{R*}}{\partial \lambda} < 0$; $\frac{\partial e^{R*}}{\partial \lambda} > 0$; 当 $\theta > \sqrt{bk}$ 时, $\frac{\partial p^{R*}}{\partial \lambda} > 0$;

0, 反之 $\frac{\partial p^{R^*}}{\partial \lambda} \leq 0; \frac{\partial D^{R^*}}{\partial \lambda} > 0; \frac{\partial \Pi_m^{R^*}}{\partial \lambda} < 0; \frac{\partial \Pi_r^{R^*}}{\partial \lambda} > 0$.

3) $\frac{\partial \tau^{N^*}}{\partial \lambda} < 0; \frac{\partial e^{N^*}}{\partial \lambda} > 0$; 当 $\theta > \sqrt{bk}$ 时, $\frac{\partial p^{N^*}}{\partial \lambda} >$

0, 反之 $\frac{\partial p^{N^*}}{\partial \lambda} \leq 0, \frac{\partial D^{N^*}}{\partial \lambda} > 0$; 当 $\lambda_2 < \lambda < 1$ 时, $\frac{\partial \Pi_m^{N^*}}{\partial \lambda} < 0$, 反之 $\frac{\partial \Pi_m^{N^*}}{\partial \lambda} \geq 0$; 当 $\lambda_3 < \lambda < 1$ 时, $\frac{\partial \Pi_r^{N^*}}{\partial \lambda} > 0$, 反之 $\frac{\partial \Pi_r^{N^*}}{\partial \lambda} \leq 0$. 其中

$$\lambda_1 = \frac{kb^2(A - \Delta)^2 + 2\delta\theta^2}{kb(16\delta - b(A - \Delta)^2)},$$

$$\lambda_2 = \frac{-\Delta k^2 b^3(A - \Delta) - kb^2(4\delta k + 2kb(kb^2\Delta(A + \frac{1}{2}\Delta) + b(k\delta - (A - \Delta)^2) + 6k\delta\theta^2 - 2\delta\theta^2) - \frac{1}{4}\Delta\theta^2(A - \Delta)) - \frac{1}{2}\delta\theta^2)}{2kb(kb^2\Delta(A + \frac{1}{2}\Delta) + b(k\delta - (A - \Delta)^2) + 6k\delta\theta^2 - 2\delta\theta^2) - \frac{1}{4}\Delta\theta^2(A - \Delta) - \frac{1}{2}\delta\theta^2)},$$

$$\lambda_3 = \frac{4\Delta k^2 b^3(A - \Delta) + kb^2(8\delta k + kb\theta^2(b\Delta(A - (A - \Delta)^2) - 6k\delta\theta^2 + 2\delta\theta^2) - \Delta) + 2\delta)}{kb\theta^2(b\Delta(A - (A - \Delta)^2) - 6k\delta\theta^2 + 2\delta\theta^2) - \Delta + 2\delta)}.$$

证明 1) 由定理2至定理4所得均衡结果及最大利润可得

$$\frac{\partial \tau^{M^*}}{\partial \lambda} = \frac{2bk\delta\theta^2(\Delta - A)(a - bc_n)}{(kb(\lambda - 1)(b(a - \Delta)^2 - 8\delta) - 2\delta\theta^2)^2} > 0;$$

$$\frac{\partial e^{M^*}}{\partial \lambda} = \frac{2bk\delta\theta(bc_n - a)(b(a - \Delta)^2 - 8\delta)}{(kb(\lambda - 1)(b(a - \Delta)^2 - 8\delta) - 2\delta\theta^2)^2} > 0;$$

$$\frac{\partial p^{M^*}}{\partial \lambda} = \frac{2k\delta\theta^2(bc_n - a)(b(a - \Delta)^2 - 8\delta)}{(kb(\lambda - 1)(b(a - \Delta)^2 - 8\delta) - 2\delta\theta^2)^2} > 0;$$

$$\frac{\partial D^{M^*}}{\partial \lambda} = \frac{4bk\delta^2\theta^2(a - bc_n)}{(kb(\lambda - 1)(b(a - \Delta)^2 - 8\delta) - 2\delta\theta^2)^2} > 0;$$

$$\frac{\partial \Pi_m^{M^*}}{\partial \lambda} = \frac{2k\delta^2\theta^2(a - bc_n)^2}{(kb(\lambda - 1)(b(a - \Delta)^2 - 8\delta) - 2\delta\theta^2)^2} > 0;$$

$$\frac{\partial \Pi_r^{M^*}}{\partial \lambda} = \frac{2k\delta^2\theta^2(a - bc_n)^2(kb^2(\lambda + 1)(A - \Delta)^2 - 16\delta b k \lambda + 2\delta\theta^2)}{(kb(\lambda - 1)(b(a - \Delta)^2 - 8\delta) - 2\delta\theta^2)^2} \rightarrow$$

当 $0 < \lambda < \lambda_1$ 时, $\frac{\partial \Pi_r^{M^*}}{\partial \lambda} > 0$, 反之 $\frac{\partial \Pi_r^{M^*}}{\partial \lambda} \leq 0$.

2)、3)与1)的证明过程类似,故省略证明过程. □

性质1表明:碳减排量及市场需求总是与零售商持股比例成正向关系. 仅在制造商主导情况下,回收率及销售价格与持股比例成正向关系;而零售商主导及无主导者情况下,回收率与持股比例呈反向关系,销售价格与持股比例的关系需视消费者的碳减排敏感程度而定. 主导企业的利润总是随持股比例的增加而增加;而Nash博弈下,企业利润关于持股比例的增减,需视持股比例的相对大小而定.

性质1揭示出低碳闭环供应链中,渠道结构不会

影响单位产品碳减排量、市场需求与持股比例的关系,只会影响废旧产品回收率、单位产品销售价格及企业利润与持股比例的关系.

性质2 $\frac{\partial \tau^{Y^*}}{\partial \theta} > 0, \frac{\partial e^{Y^*}}{\partial \theta} > 0, \frac{\partial p^{Y^*}}{\partial \theta} > 0, \frac{\partial D^{Y^*}}{\partial \theta} > 0, \frac{\partial \Pi_m^{Y^*}}{\partial \theta} > 0, \frac{\partial \Pi_r^{Y^*}}{\partial \theta} > 0$, 其中 $Y = \{M, R, N\}$.

性质2表明,3种权力结构下的低碳闭环供应链,企业最优决策及最大利润均随着消费者碳减排的敏感系数增加而增加,即消费者环保意识的提高有利于企业进行资源有偿循环再利用及减少碳排放,同时提高自身利润,因此制造商和零售商都有动力提高消费者环保意识. 例如,2020年空调能效新标GB 21455-2019正式实施,素以节能科技著称的格力电器通过小程序、直播等“新零售”模式,展示其绿色、节能技术,吸引消费者,连续26年市场领跑. 2021年京东将“双十一”作为契机,倡导和践行低碳发展方式和生活方式,“绿色消费”商品的种类超过1.5亿种.

推论1 当 $\lambda > \lambda_4$ 时, $\tau^{M^*} > \tau^{N^*}$, 反之 $\tau^{M^*} \leq \tau^{N^*}$; 当 $\lambda > \frac{2\delta}{6\delta - A(A - \Delta)}$ 时, $e^{M^*} > e^{N^*}$, 反之 $e^{M^*} \leq e^{N^*}$; 当 $\lambda > \lambda_5$ 时, $D^{M^*} > D^{N^*}$, 反之 $D^{M^*} \leq D^{N^*}$. 其中

$$\lambda_4 = \frac{4kb\Delta - A\theta^2 + (4k^2b^2(A + \Delta)^2 - 8kb\Delta A\theta^2 + A^2\theta^4)^{\frac{1}{2}}}{2kb(A + 3\Delta)},$$

$$\lambda_5 = \frac{kb^2\Delta(A - \Delta) - 2\delta\theta^2}{2kb(b\Delta(A - \Delta) + 2\delta) + \frac{(k^2b^3\Delta(A + \Delta)(b\Delta(A + \Delta) + 8\delta) - 4\delta(\Delta\theta^2(A - \Delta) - 4k\delta) + 4\delta^2\theta^2)^{\frac{1}{2}}}{\Delta + 2\delta}}.$$

推论1表明,在制造商主导和Nash博弈的低碳闭环供应链中,废旧产品的回收率、产品的碳减排量及市场需求的大小需视零售商持股比例大小而定,当持股比例大于一定阈值时,制造商主导下废旧产品回收率、碳减排量和市场需求更高,反之Nash博弈下更优.

推论2 当 $\lambda > \lambda_6$ 时, $\tau^{R^*} > \tau^{N^*}, e^{R^*} > e^{N^*}, D^{R^*} > D^{N^*}$; 反之, $\tau^{R^*} \leq \tau^{N^*}, e^{R^*} \leq e^{N^*}, D^{R^*} \leq D^{N^*}$. 当 $\theta > \sqrt{bk}$ 且 $\lambda > \lambda_6$, 或 $0 < \theta < \sqrt{bk}$ 且 $\lambda > \lambda_6$ 时, $p^{R^*} > p^{N^*}$; 反之, $p^{R^*} \leq p^{N^*}$. 其中

$$\lambda_6 = \frac{2kb\delta - kb^2(A - \Delta) - 2\delta\theta^2}{kb^2\Delta(A - \Delta) + 2kb\delta - 2\delta\theta^2}.$$

推论2表明,在零售商主导和Nash博弈的低碳闭环供应链中,当持股比例大于一定阈值时,零售商主导更有利于资源的有偿循环再利用,减少碳排放,同

时拓展市场需求,反之则Nash博弈下更优.两种情形下产品销售价格的高低则受零售商持股比例和消费者环保意识的影响.

推论3 当 $\lambda > \lambda_7$ 时, $\tau^{R^*} > \tau^{M^*}$,反之 $\tau^{R^*} \leq \tau^{M^*}$;当 $\lambda > \lambda_8$ 时, $e^{R^*} > e^{M^*}$,反之 $e^{R^*} \leq e^{M^*}$;当 $\lambda > \lambda_9$ 时, $D^{M^*} > D^{R^*}$,反之 $D^{M^*} \leq D^{R^*}$.其中

$$\lambda_7 = \frac{B + \sqrt{C}}{2kb(b\Delta(A - \Delta)^2 + 4\delta(A + \Delta)) - 4\theta^2(A - \Delta)},$$

$$B = 4kbb\delta(A + \Delta) - kb^2(A - 2\Delta)(A - \Delta)^2 - \theta^2(6A - 4\Delta),$$

$$C = k^2b^2(Ab(A - \Delta)^2 + 4\delta(A + \Delta))^2 + 4Akb\theta^2(b(A - 2\Delta)(A - \Delta)^2 - 4\delta(A + \Delta)) + 4A\theta^4(5A - 4\Delta);$$

$$\lambda_8 = \frac{-b^2(A - \Delta)^2 - 2\delta\theta^2}{b^2(A - \Delta)^2 - 4kbb\delta - 2\delta\theta^2};$$

$$\lambda_9 = \frac{2kbb\delta - b^2\Delta - 3\delta\theta^2}{2\delta(2kbb - \theta^2)} + \frac{(\delta^2(4k^2b^2 - 4kn\theta^4 + 5\theta^4) - 2\delta(2kbb - \theta^2))}{2\delta(2kbb - \theta^2)} \rightarrow \leftarrow \frac{2b^2\delta(2Akb - \theta^2(A + 2\Delta)) + \delta^2b^4}{\theta^2}.$$

推论3表明:在制造商主导和零售商主导的低碳闭环供应链中,当持股比例大于一定阈值时,相较于制造商主导情形,零售商主导情形下的回收率、碳减排量更高,但市场需求较低;反之,制造商主导情形下的回收率、碳减排量更高,市场需求降低.

综合推论1~推论3,渠道权力结构的转变以及零售商的持股比例对低碳闭环供应链的回收、碳减排及市场需求的变化都产生了影响.当持股比例达到一定的阈值($\lambda > \max\{\lambda_7, \lambda_8, \lambda_9\}$)时,零售商主导下废旧产品的回收率、产品的碳减排量及市场需求最高.当制造商与零售商的话语权较均衡时,较小的持股比例即可实现低碳闭环供应链的优化.

推论4 $\Pi_r^{R^*} > \Pi_r^{N^*}$.当 $0 < \lambda < \lambda_1$ 时, $\Pi_m^{R^*} > \Pi_m^{N^*}$;当 $\lambda > \lambda_1$ 时, $\Pi_m^{R^*} \leq \Pi_m^{N^*}$.

推论4表明:相较于Nash博弈结构,零售商利润总是在自身主导的情况下更高;制造商利润需视零售商的持股比例而定,当持股比例较低时,零售商主导下制造商的利润较Nash博弈更高.推论4进一步揭示出,无论成员企业碳减排程度及持股比例如何制定,低碳闭环供应链中权力结构更大的一方将总是获得更高的利润.

推论5 1) 制造商主导情形下,当 $\lambda = \frac{2kb}{2kb + \theta^2}$

时, $\tau^{M^*} = \tau^{C^*}$, $D^{M^*} = D^{C^*}$;当 $\lambda = \frac{4\delta}{8\delta - (A - \Delta)^2}$ 时, $e^{M^*} = e^{C^*}$. 2) 零售商主导情形下,当 $\lambda = \frac{(bk(b(A - \Delta)^2 - 4\delta) + 2\delta\theta^2)(A - \Delta)}{bk(b\Delta(A - \Delta)^2 + 4A\delta) - 2A\delta\theta^2}$ 时, $\tau^{R^*} = \tau^{C^*}$;当 $\lambda = \frac{-bk(b(A - \Delta)^2 - 4\delta) - 2\delta\theta^2}{bk(2b\Delta(A - \Delta)^2 + 4\delta) - 2\delta\theta^2}$ 时, $e^{R^*} = e^{C^*}$, $D^{R^*} = D^{C^*}$. 3) Nash 博弈情形下,当 $\lambda = \frac{bk(A - \Delta)}{Abk + \Delta(kb - \theta^2)}$ 时, $\tau^{N^*} = \tau^{C^*}$;当 $\lambda = \frac{2\delta}{\Delta(A - \Delta) + 2\delta}$ 时, $e^{N^*} = e^{C^*}$, $D^{N^*} = D^{C^*}$.

当零售商持股比例分别满足一定条件时,无论何种权力结构,废旧产品回收率、产品碳减排量及市场需求均可达到集中式水平.

若要实现分散式决策下低碳闭环供应链的利润达到集中式决策水平,即

$$\Pi_{sc}^{C^*} = \Pi_{sc}^{M^*}, \Pi_{sc}^{C^*} = \Pi_{sc}^{R^*}, \Pi_{sc}^{C^*} = \Pi_{sc}^{N^*},$$

则需分别满足如下条件:

$$\lambda_{10} = \frac{(-8kbb\delta - 4\delta\theta^2 - 2(2\delta\theta^2(kb((A - \Delta)^2 - \delta) + 2\delta\theta^2)))^{\frac{1}{2}}}{(b(A - \Delta))^2 - 12\delta\theta^2 - 8kbb\delta},$$

$$\lambda_{11} = \frac{((b\Delta(k(kb(b(A - \Delta)^2 - 4\delta) + 2\delta\theta^2))^{\frac{1}{2}} - kb(2b\Delta(A - \Delta) + 4\delta) + 2\delta\theta^2)(kb(b(A - \Delta)^2 - 4\delta) + 2\delta\theta^2))/}{(3k^2b^4\Delta^2(A - \Delta)^2 + 4k^2b^3\Delta\delta(4A - 3\Delta) - 2kb^2\delta(\Delta\theta^2(4A - 3\Delta) - 2k\delta) - 16kbb\delta^2\theta^2 + 4\delta^2\theta^4),}$$

$$\lambda_{12} = \frac{\Delta(k(kb(b(A - \Delta)^2 - 4\delta) + 2\delta\theta^2))^{\frac{1}{2}} + k(Ab\Delta - b\Delta^2 + 2\delta)}{2k(Ab\Delta + \delta) - \Delta^2\theta^2}.$$

λ_{10} 、 λ_{11} 、 λ_{12} 的取值不在前文假设

$$\lambda > \frac{kb(b(A - \Delta)^2 - 8\delta) + 2\delta\theta^2}{kb(b(A - \Delta)^2 - 8\delta)},$$

$$k > \frac{2\delta\theta^2}{b(1 - \lambda)(8\delta - b(A - \Delta)^2)}$$

范围内,故分散式决策下低碳闭环供应链的利润都不能达到集中式决策水平.

4 两部定价协调契约

4.1 制造商主导的协调模型(TM模型)

制造商主导的低碳闭环供应链中,股权合作仅可实现部分协调,进一步采用两部定价契约以实现低碳闭环供应链的完美协调.假设制造商选择边际成本定价,同时向零售商收取固定费用 S .此时,制造商和零售商的利润分别为

$$\text{Max } \Pi_m^{\text{TM}} = (1 - \lambda)(w - c_n + \tau\Delta)D(p, e) - \delta\tau^2 -$$

$$A\tau D(p, e) - \frac{1}{2}(1 - \lambda)ke^2 + S, \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \text{Max } \Pi_r^{\text{TM}} &= (p - w)D(p, e) + \frac{1}{2}\lambda ke^2 + \\ &\lambda(w - c_n + \tau\Delta)D(p, e) - S. \end{aligned} \quad (8)$$

根据定理1及定理2的均衡结果,同时考虑制造商协调时的激励相容和零售商的理性约束,存在以下约束

$$\begin{cases} \tau^{\text{TM}} = \tau^C, e^{\text{TM}} = e^C, \\ p^{\text{TM}} = p^C, D^{\text{TM}} = D^C, \\ \Pi_m^{\text{TM}} \geq \Pi_m^M, \Pi_r^{\text{TM}} \geq \Pi_r^M. \end{cases} \quad (9)$$

进而得到协调后的制造商及零售商的利润分别为

$$\begin{aligned} \Pi_m^{\text{TM}} &= \\ &\frac{k\delta(a - bc_n)^2(2\delta\theta^2(\lambda - 1) - kb^2(A - \Delta)^2)}{(kb(b(A - \Delta)^2 - 4\delta) + 2\delta\theta^2)^2} + S, \end{aligned} \quad (10)$$

$$\Pi_r^{\text{TM}} = \frac{k\delta(a - bc_n)^2(4bk^2 - 2\lambda\theta^2)}{(kb(b(A - \Delta)^2 - 4\delta) + 2\delta\theta^2)^2} - S. \quad (11)$$

$\Delta\Pi_m^{\text{TM}} = \Pi_m^{\text{TM}} - \Pi_m^M$ 是协调后制造商的利润增量,有

$$\begin{aligned} \Delta\Pi_m^{\text{TM}} &= \\ &(2bk^2\delta^2(a - bc_n)^2(8\delta(\lambda - 1)(kb - \lambda\theta^2) - \\ &b\theta^2\lambda^2(A - \Delta)^2))/((kb(b(A - \Delta)^2 - 4\delta) + \\ &2\delta\theta^2)^2(kb(\lambda - 1)(b(A - \Delta)^2 - 8\delta) - 2\delta\theta^2)^2); \end{aligned}$$

$\Delta\Pi_r^{\text{TM}} = \Pi_r^{\text{TM}} - \Pi_r^M$ 是协调后零售商的利润增量,有

$$\begin{aligned} \Delta\Pi_r^{\text{TM}} &= \\ &(2bk^2\delta^2(a - bc_n)^2(16b^2k^2\delta(\lambda - 1)^2(b(A - \Delta)^2 - \\ &6\delta)) + \lambda\theta^4(8\delta^2(\lambda - 4) - 4b\lambda\delta(A - \Delta)^2) + \\ &bk\theta^2(\lambda - 1)(\lambda^2(b(A - \Delta)^2 - 8\delta) + 8\delta\lambda(b(A - \\ &\Delta)^2 - 4\delta) - 16\delta^2))/((kb(b(A - \Delta)^2 - 4\delta) + \\ &2\delta\theta^2)^2(kb(\lambda - 1)(b(A - \Delta)^2 - 8\delta) - 2\delta\theta^2)^2). \end{aligned}$$

只有当 $-\Delta\Pi_m^{\text{TM}} < S < \Delta\Pi_r^{\text{TM}}$ 时,制造商和零售商才有动机采用协调契约。

推论6 对制造商主导的分散式低碳闭环供应链,在两部定价契约下,当 $-\Delta\Pi_m^{\text{TM}} < S < \Delta\Pi_r^{\text{TM}}$ 时,低碳闭环供应链可以实现完美协调,且协调后制造商的利润增量是零售商持股比例的增函数。

4.2 零售商主导的协调模型(TR模型)

与制造商主导的协调模型类似,零售商向制造商收取固定费用 T ,进而得到协调后的制造商及零售商的利润分别为

$$\Pi_m^{\text{TR}} =$$

$$\begin{aligned} &\frac{2k\delta(1 - \lambda)(a - bc_n)^2(kb^2A\Delta + \delta(2kb - \theta^2))}{(kb^2(A - \Delta)^2 - 4kbb\delta + 2\delta\theta^2)^2} - \\ &\frac{k^2b^2\delta(a - bc_n)^2(A^2 + \Delta^2(2\lambda^2 - 2\lambda + 1))}{(kb^2(A - \Delta)^2 - 4kbb\delta + 2\delta\theta^2)^2} - T, \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \Pi_r^{\text{TR}} &= \\ &\frac{2k\lambda\delta(a - bc_n)^2(kb^2\Delta(A + \Delta(\lambda - 1)))}{(kb^2(A - \Delta)^2 - 4kbb\delta + 2\delta\theta^2)^2} + \\ &\frac{2k\lambda\delta(a - bc_n)^2(2kbb\delta - \delta\theta^2)}{(kb^2(A - \Delta)^2 - 4kbb\delta + 2\delta\theta^2)^2} + T. \end{aligned} \quad (13)$$

$\Delta\Pi_m^{\text{TR}} = \Pi_m^{\text{TR}} - \Pi_m^R$ 是协调后制造商的利润增量,有

$$\begin{aligned} \Delta\Pi_m^{\text{TR}} &= \\ &k\delta(a - bc_n)^2(k(\Delta^2(2\lambda^2 - 2\lambda + 1) + 2A\Delta(\lambda - \\ &1) + A^2) + (\lambda - 1)(4kbb\delta - 2\delta\theta^2))/(kb^2(A - \\ &\Delta)^2 - 4kbb\delta + 2\delta\theta^2)^2 + (k\delta(a - bc_n)^2(kb^2((\lambda - \\ &1)\Delta + A)^2 + 2\delta(\lambda - 1)(2kb - \theta^2)))/(4(k\Delta((\lambda - \\ &1) + A)(A - \Delta)b^2 + \delta(\lambda - 2)(2kb - \theta^2))^2); \end{aligned}$$

$\Delta\Pi_r^{\text{TR}} = \Pi_r^{\text{TR}} - \Pi_r^R$ 是协调后零售商的利润增量,有

$$\begin{aligned} \Delta\Pi_r^{\text{TR}} &= \\ &-2k\lambda\delta(a - bc_n)^2(kb^2\Delta(A + \Delta(\lambda - 1)) + \\ &2kbb\delta - \delta\theta^2)/(kb^2(A - \Delta)^2 - 4kbb\delta + 2\delta\theta^2)^2 + \\ &k\delta(a - bc_n)^2/(kb^2((\lambda - 1) + \\ &A)(A - \Delta) + 2\delta(\lambda - 2)(2kb - \theta^2)). \end{aligned}$$

只有当 $-\Delta\Pi_r^{\text{TR}} < T < \Delta\Pi_m^{\text{TR}}$ 时,制造商和零售商才有动机采用协调契约。

推论7 对于零售商主导的分散式低碳闭环供应链,在两部定价契约下,当 $-\Delta\Pi_r^{\text{TR}} < T < \Delta\Pi_m^{\text{TR}}$ 时,低碳闭环供应链可以实现完美协调,且协调后零售商的利润增量是其持股比例的增函数。

4.3 Nash博弈的协调模型(TN模型)

与制造商主导的协调模型类似,制造商向零售商收取固定费用 Z ,进而得到协调后的制造商及零售商的利润分别为

$$\Pi_m^{\text{TN}} = \frac{-k^2b^2\delta(a - bc_n)^2(A - \Delta)^2}{(kb^2(A - \Delta)^2 - 4kbb\delta + 2\delta\theta^2)^2} + Z, \quad (14)$$

$$\Pi_r^{\text{TN}} = \frac{2k\delta^2(2kb - \theta^2)(a - bc_n)^2}{(kb^2(A - \Delta)^2 - 4kbb\delta + 2\delta\theta^2)^2} - Z. \quad (15)$$

$\Delta\Pi_m^{\text{TN}} = \Pi_m^{\text{TN}} - \Pi_m^N$ 是协调后制造商的利润增量,有

$$\begin{aligned} \Delta\Pi_m^{\text{TN}} &= \\ &-k^2b^2\delta(a - bc_n)^2(A - \Delta)^2/(kb^2(A - \Delta)^2 - \end{aligned}$$

$$4k\delta + 2\delta\theta^2)^2 + k\delta(a - bc_n)^2(kb^2((\lambda - 1)\Delta + A) + 2\delta(\lambda - 1)(2bk - \theta^2))/(2k\delta(\lambda - 3) + 2\delta\theta^2 + kb^2(A - \Delta)((\lambda - 1)\Delta + A))^2;$$

$\Delta\Pi_r^{TN} = \Pi_r^{TN} - \Pi_r^N$ 是协调后零售商的利润增量,有

$$\Delta\Pi_r^{TN} = 2k\delta^2(2kb - \theta^2)(a - bc_n)^2/(kb^2(A - \Delta)^2 - 4k\delta + 2\delta\theta^2)^2 - k\delta^2(a - bc_n)^2(4kb - 2k\lambda\theta^2)/(2k\delta(\lambda - 3) + 2\delta\theta^2 + kb^2(A - \Delta)((\lambda - 1)\Delta + A))^2.$$

只有当 $-\Delta\Pi_m^{TN} < Z < \Delta\Pi_r^{TN}$ 时,制造商和零售商才有动机采用协调契约.

推论8 对于Nash博弈的分散式低碳闭环供应链,在两部定价契约下,当 $-\Delta\Pi_m^{TN} < Z < \Delta\Pi_r^{TN}$ 时,低碳闭环供应链可以实现完美协调.

推论6~推论8表明,当股权合作仅能实现不同权力结构下低碳闭环供应链的部分协调时,通过两部定价契约灵活设定契约参数,形成闭环供应链利润在两者间的自由组合,能够有效提升双方利润,实现系统整体的利益协调.

性质3 1) $\frac{\partial\Pi_m^{TM}}{\partial\lambda} > 0, \frac{\partial\Pi_r^{TM}}{\partial\lambda} < 0, \frac{\partial\Pi_m^{TR}}{\partial\lambda} < 0, \frac{\partial\Pi_r^{TR}}{\partial\lambda} > 0$. 当 $\lambda_{13} < \lambda < 1$ 时, $\frac{\partial\Pi_m^{TN}}{\partial\lambda} < 0, \frac{\partial\Pi_r^{TN}}{\partial\lambda} > 0$;反之, $\frac{\partial\Pi_m^{TN}}{\partial\lambda} > 0, \frac{\partial\Pi_r^{TN}}{\partial\lambda} < 0$.

2) $\frac{\partial\Pi_m^W}{\partial\theta} > 0, \frac{\partial\Pi_r^W}{\partial\theta} > 0$. 其中

$$\lambda_{13} = \frac{-3k^2b^3\Delta(A - \Delta) - kb^2(6k\delta + \theta^2(A - \Delta)^2) + 6kb\delta\theta^2 - 2\delta\theta^4}{kb(kb^2\Delta(2A + \Delta) + b(2k\delta - A\Delta\theta^2) - 2\delta\theta^2)},$$

$$W = \{TM, TR, TN\}.$$

性质3表明,在对低碳闭环供应链进行协调后,零售商持股比例的提高总是有利于提高渠道主导者的利润,而跟随者的利润会降低,在Nash博弈情形下,制造商与零售商的利润的增减视零售商持股比例的变化而定,而消费者低碳敏感系数对于制造商与零售商利润增加总是有利的.这与性质1相似,此处不再赘述.

5 算例分析

本节通过数值算例验证文中的主要结论,参照文献[20]等的参数设置,相关的参数假设如下: $c_n = 1, \Delta = 0.2, A = 0.05, k = 0.8, \delta = 1, a = 5, b = 0.8$, 在上述参数假定下可知零售商持股比例 $\lambda < 0.75$. 在

5.1节探讨持股比例对最优决策的影响时,令 $\theta = 0.2$; 在5.2节探讨消费者低碳敏感系数对最优决策的影响时,令 $\lambda = 0.7$.

5.1 持股比例对决策变量的影响

从图1~图3可以看出:无论在何种权力结构下,零售商持股比例的增加总是有利于碳减排量及市场需求的提高;制造商主导的渠道结构中,废旧产品回收率会随着持股比例的增加而增大,而零售商主导与Nash博弈结构中,则随之减小,这验证了性质1的相关结论.当 $\lambda > 0.267$ 时,制造商主导下的回收率最高;当 $\lambda > 0.331$ 时,制造商主导下的碳减排量最高.同时,制造商主导下产品需求较小,只有当零售商持股比例较大时,市场需求才会大幅增加,但这在实际中是很难实现的,验证了推论1及推论2的内容.当 $\lambda = 0.723$ 时,制造商主导下废旧产品的回收率和市场需求达到集中式决策水平;当 $\lambda = 0.508$ 时,制造商主导下单位产品碳减排量达到集中式决策水平,验证了推论5的内容.

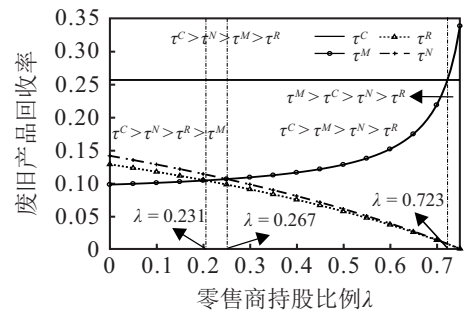


图1 持股比例λ对回收率的影响

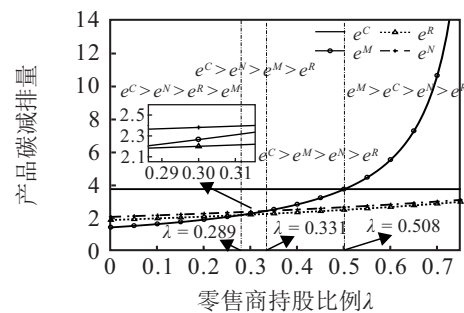


图2 持股比例λ对碳减排量的影响

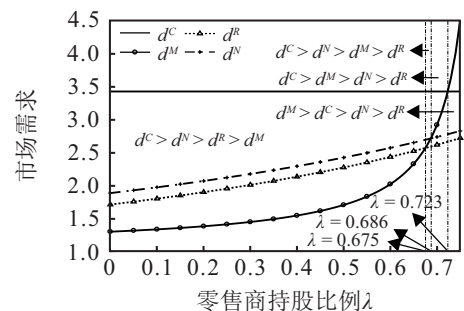


图3 持股比例λ对市场需求的影

5.2 消费者低碳敏感系数对决策变量的影响

从图4~图6可以看出:无论在何种权力结构下,消费者低碳敏感系数的增加总是有利于制造商从事碳减排及回收再制造,增加市场需求,验证了本文性质2的相关结论.当 $\theta < 0.796$ 时,零售商主导或Nash博弈下碳减排量、废旧产品回收率及市场需求最高;当 $\theta \geq 0.796$ 时,制造商主导下碳减排量、废旧产品回收率及市场需求最高.

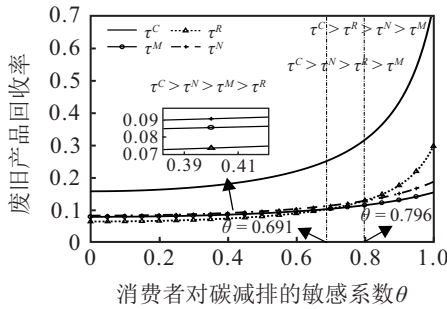


图4 消费者低碳敏感系数 θ 对回收率的影响

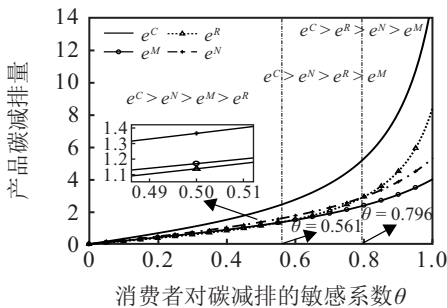


图5 消费者低碳敏感系数 θ 对碳减排量的影响

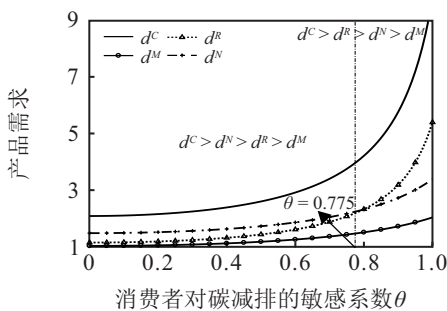


图6 消费者低碳敏感系数 θ 对市场的影响

5.3 持股比例和消费者低碳敏感系数对最优利润的影响

图7~图9表明:在前文参数的设定下,企业和闭环供应链利润随着消费者低碳敏感系数增加而增加;零售商持股比例的增加对于制造商与零售商而言均不总是有利的,渠道主导者的利润总是随着零售商持股比例的增加,而增加;在Nash博弈下,制造商与零售商的利润视零售商持股比例的变化而定,验证了本文性质1的部分结论.企业在拥有更高的话语权时利润更大,制造商主导下制造商利润总是最高的,零售商主导下零售商利润最高,Nash博弈中制造商和零售

商的利润大小需视零售商持股比例大小而定,合适的持股比例可实现企业的“双赢”,这验证了本文推论4的部分内容.契约协调后,Stackelberg博弈及Nash博弈下,制造商与零售商利润均得到提高,且利润增长值与零售商持股比例成正比,系统整体利润达到集中式水平,闭环供应链实现完美协调,验证了推论6~推论8的结论.

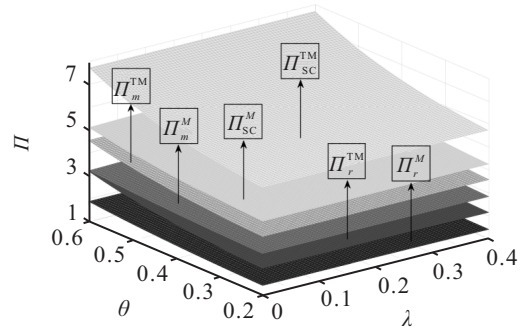


图7 协调前后 λ 和 θ 对制造商主导低碳闭环供应链利润的影响

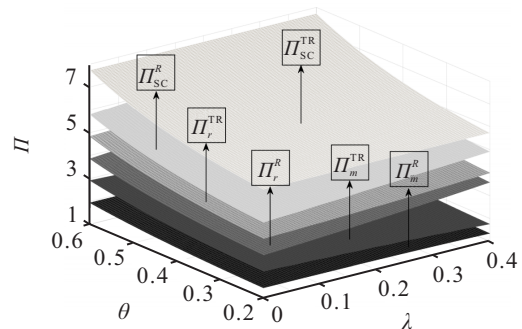


图8 协调前后 λ 和 θ 对零售商主导低碳闭环供应链利润的影响

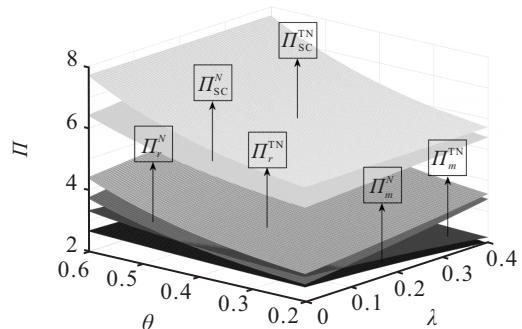


图9 协调前后 λ 和 θ 对Nash博弈低碳闭环供应链利润的影响

6 结论

随着环境法规的日益完善以及消费者环保意识的增强,越来越多的制造企业在生产过程中实施再制造及碳减排,实现从传统制造向循环低碳生产转型.本文针对由一个制造商和一个零售商组成的低碳闭环供应链,分析了3种权力结构下闭环供应链决策及协调问题,探讨了零售商持股比例和消费者对碳减排的敏感度对企业决策的影响,设计了不同权力结

构下协调闭环供应链的两部定价契约,得到以下主要结论:

1)无论在何种权力结构下,消费者低碳环保意识的增强,有助于制造商的再制造及碳减排、扩大市场需求、增加企业及低碳闭环供应链整体利润。

2)零售商持股比例的增加有利于低碳生产,但同时产品的销售价格也相应提高,虽然由于消费者的低碳环保意识,产品的需求仍会增加,企业也应通过提高产品售后质量等方式提升消费者体验。

3)不同权力结构下,闭环供应链应选择合适的持股比例,零售商主导的渠道结构中,按照更高的比例持股,废旧产品的回收率、产品的碳减排量及市场需求最大;Nash博弈下,较低的持股比例是更优的选择。

4)Stackelberg博弈下,零售商持股比例的增加总是提高主导企业的利润,而不一定提高跟随企业的利润;Nash博弈下,企业利润的增减与零售商持股比例和消费者低碳敏感系数相关。

5)无论何种权力结构,当持股比例满足一定条件时,碳减排量、废旧产品回收率及市场需求均可达到集中式决策水平,但低碳闭环供应链整体利润仍无法达到,实行两部定价契约灵活设定契约参数,可以实现闭环供应链的完美协调。

本文考虑了制造商回收的闭环供应链系统,下一步将研究其他回收模式下不同权力结构及股权合作的低碳闭环供应链决策及协调等问题。

参考文献(References)

- [1] 人民网. 企业应将履行社会责任提升到战略高度 [EB/OL]. (2017-07-24)[2021-10-31]. <http://theory.people.com.cn/GB/n1/2017/0724/c40531-29423329.html>.
- [2] Choi T M, Li Y, Xu L. Channel leadership, performance and coordination in closed loop supply chains[J]. *International Journal of Production Economics*, 2013, 146(1): 371-380.
- [3] Zheng B R, Yang C, Yang J, et al. Dual-channel closed loop supply chains: Forward channel competition, power structures and coordination[J]. *International Journal of Production Research*, 2017, 55(12): 3510-3527.
- [4] Yang F, Wang M M, Ang S. Optimal remanufacturing decisions in supply chains considering consumers' anticipated regret and power structures[J]. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2021, 148: 102267.
- [5] 闻卉, 郑本荣, 曹晓刚, 等. 不同渠道权力结构下的双渠道闭环供应链定价与协调决策[J]. *运筹与管理*, 2020, 29(6): 65-74.
- (Wen H, Zheng B R, Cao X G, et al. Pricing and coordination of dual channel closed-loop supply chain with different channel power structure[J]. *Operations Research and Management Science*, 2020, 29(6): 65-74.)
- [6] 王竟竟, 许民利. 不同权力结构和联盟策略下风险规避型闭环供应链决策[J]. *中国管理科学*, 2021, 29(9): 111-122.
- (Wang J J, Xu M L. Study on decisions of A closed-loop supply chain with risk aversion under different power structures and alliance strategies[J]. *Chinese Journal of Management Science*, 2021, 29(9): 111-122.)
- [7] 姚锋敏, 闫颖洛, 滕春贤. 考虑CSR行为及渠道权力结构的闭环供应链定价决策[J]. *管理评论*, 2022, 34(1): 283-294.
- (Yao F M, Yan Y L, Teng C X. Pricing decision for closed-loop supply chain considering corporate social responsibility and channel power structure[J]. *Management Review*, 2022, 34(1): 283-294.)
- [8] Heydari J, Govindan K, Jafari A. Reverse and closed loop supply chain coordination by considering government role[J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2017, 52: 379-398.
- [9] Dou G, Cao K. A joint analysis of environmental and economic performances of closed-loop supply chains under carbon tax regulation[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2020, 146: 106624.
- [10] 王娜, 张玉林. 专利保护下闭环供应链碳减排及协调决策[J]. *控制与决策*, 2022, 37(5): 1378-1388.
- (Wang N, Zhang Y L. Carbon emission reduction and coordination decisions of closed-loop supply chain under patent protection[J]. *Control and Decision*, 2022, 37(5): 1378-1388.)
- [11] Chai Q, Xiao Z, Lai K, et al. Can carbon cap and trade mechanism be beneficial for remanufacturing? [J]. *International Journal of Production Economics*, 2018, 203: 311-321.
- [12] Wang Z R, Wu Q H. Carbon emission reduction and product collection decisions in the closed-loop supply chain with cap-and-trade regulation[J]. *International Journal of Production Research*, 2021, 59(14): 4359-4383.
- [13] Xing E F, Shi C D, Zhang J X, et al. Double third-party recycling closed-loop supply chain decision under the perspective of carbon trading[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 259: 120651.
- [14] Li Z, Pan Y, Yang W, et al. Effects of government subsidies on green technology investment and green marketing coordination of supply chain under the cap-and-trade mechanism[J]. *Energy Economics*, 2021, 101: 105426.

- [15] Xie D C, Chen H. Coordinating dual-channel supply chain under price mechanism with production cost disruption[J]. *Management Science and Engineering*, 2015, 9(2): 1-7.
- [16] Xiao T J, Qi X T. Price competition, cost and demand disruptions and coordination of a supply chain with one manufacturer and two competing retailers[J]. *Omega*, 2008, 36(5): 741-753.
- [17] 王文宾, 丁军飞, 达庆利. 奖惩机制下闭环供应链的成本共担-利润共享契约[J]. *控制与决策*, 2019, 34(4): 843-850.
(Wang W B, Ding J F, Da Q L. Cost-profit sharing contract for a closed-loop supply chain under reward-penalty mechanism[J]. *Control and Decision*, 2019, 34(4): 843-850.)
- [18] Fu H, Ma Y K, Cai X Q. Downstream firm's investment with equity holding in decentralized assembly systems[J]. *Omega*, 2018, 75: 27-56.
- [19] 王旭坪, 樊文平, 阮俊虎, 等. 考虑纵向持股的现代农业供应链运营决策与协调优化研究[J]. *中国管理科学*, 2022, 30(10): 165-176.
(Wang X P, Fan W P, Ruan J H, et al. Research on operation decision and coordination optimization of modern agricultural supply chain considering vertical shareholding[J]. *Chinese Journal of Management Science*, 2022, 30(10): 165-176.)
- [20] 刘名武, 樊文平, 付红. 零售商持股制造商减排投资的运作与优化策略[J]. *科技管理研究*, 2017, 37(16): 260-266.
(Liu M W, Fan W P, Fu H. Operation and optimization strategy when retailer holds equity in manufacturer's carbon-reducing investment[J]. *Science and Technology Management Research*, 2017, 37(16): 260-266.)
- [21] 樊文平, 王旭坪, 刘名武, 等. 不同减排合同下企业间纵向持股对供应链决策的影响[J]. *管理工程学报*, 2021, 35(1): 189-200.
(Fan W P, Wang X P, Liu M W, et al. The impact of vertical shareholding among enterprises on supply chain decisions under different emission reduction contracts[J]. *Journal of Industrial Engineering and Engineering Management*, 2021, 35(1): 189-200.)
- [22] Fu H, Ma Y. Optimization and coordination of decentralized supply chains with vertical cross-shareholding[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2019, 132: 23-35.
- [23] 夏良杰, 孔清逸, 李友东, 等. 考虑交叉持股的低碳供应链减排与定价决策研究[J]. *中国管理科学*, 2021, 29(4): 70-81.
(Xia L J, Kong Q Y, Li Y D, et al. Emission reduction and pricing strategies of a low-carbon supply chain considering cross-shareholding[J]. *Chinese Journal of Management Science*, 2021, 29(4): 70-81.)
- [24] 特斯拉. 2020年度影响力报告[EB/OL]. (2021-07-27) [2021-10-31]. <https://www.tesla.cn/impact-report/2020>.

作者简介

孙嘉轶(1984—), 女, 副教授, 博士, 从事优化理论、闭环供应链管理研究, E-mail: sjy_sjx@163.com;

杨露(1996—), 女, 硕士生, 从事物流与供应链管理的研究, E-mail: 13971288901@163.com;

张颖(1998—), 女, 硕士生, 从事绿色供应链管理的研究, E-mail: z656866158@163.com;

姚锋敏(1981—), 男, 教授, 博士生导师, 从事闭环供应链、绿色供应链管理研究, E-mail: fengmin.yao@hrbust.edu.cn.