

不同契约机制下考虑再制造的双渠道供应链决策

徐 朗^{1†}, 汪传旭¹, 施陈玲², 陈伟宏³

(1. 上海海事大学 经济管理学院, 上海 201306; 2. 中国科学技术大学 管理学院, 合肥 230026; 3. 华南理工大学 工商管理学院, 广州 510006)

摘 要: 针对由单一制造商和单一再制造商组成的双渠道供应链博弈问题, 考虑碳减排水平对再制造产品需求的影响, 引入渠道偏好系数和产品替代系数, 构建不同契约下的双渠道供应链决策模型, 分析制造商如何通过有效的协调机制激励再制造商提高减排水平. 研究表明, 改进的成本分担-收益共享契约可以实现再制造商的减排水平达到集中决策的水平, 并发现改进契约机制下协调系数的变化范围还受交叉需求替代系数和消费者对减排水平认知度的影响.

关键词: 减排; 契约机制; 供应链协调; 双渠道

中图分类号: F274

文献标志码: A

Decision of dual-channel supply chain under different incentive mechanisms considering remanufacturing

XU Lang^{1†}, WANG Chuan-xu¹, SHI Chen-ling², CHEN Wei-hong³

(1. School of Economics and Management, Shanghai Maritime University, Shanghai 201306, China; 2. School of Management, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China; 3. School of Business Administration, South China University of Technology, Guangzhou 510006, China)

Abstract: According to the game of dual channel supply chain consisting of a single manufacturer and a single remanufacturer, considering the impact of carbon emission reduction on the remanufacture product demand, channel preference coefficient and the substitution coefficient of product are introduced, the dual channel supply chain decision models under different contract mechanisms are developed, and how the manufacturer encourages remanufacturers to improve the level of emission reduction through effective coordination mechanism is analyzed. The research results show that the improved cost sharing revenue sharing contract can encourage the remanufacturer to achieve the emission reduction level of centralized decision-making, and the change range of the coordination coefficient under the improved contract mechanism is also affected by the substitution coefficient of cross demand and the consumer's awareness of carbon emission reduction level.

Keywords: emission reduction; contract mechanism; supply chain coordination; dual channel

0 引 言

随着电子商务的高速发展和信息技术的迅猛普及, 网上直销渠道得到越来越多制造商的青睐, 也使得传统销售渠道与网上直销渠道并存的双渠道模式日益常见^[1], 但作为传统渠道不仅受到其他制造商传统渠道的竞争, 也受到制造商直销渠道的冲击. 与此同时, 环境污染和资源短缺问题日益凸现出来. 为了实现经济与资源环境之间的协调发展, 世界各国纷纷制定了节能减排的相关计划, 并加快环保标准体系

建设, 严格建立低碳产品的标识和认证制度, 致使消费者的环保意识成为影响市场需求的重要因素^[2-3], 而企业不得不迎合消费者的需求偏好作出相应决策, 以提高自身利润. 低碳化不仅引起企业生产结构的更新换代, 而且也会改变企业现有的分销渠道, 进一步对供应链企业竞争与合作的策略产生明显的影响. 因此, 在传统渠道和直销渠道竞争背景下, 供应链上下游之间采取何种契约机制, 以协调不同渠道间的竞争, 实现供应链利润最大化已成为双渠道理论研究

收稿日期: 2016-10-14; 修回日期: 2017-01-15.

基金项目: 国家自然科学基金项目(71373157, 71403120); 中国博士后基金特别资助项目(2015T80172); 上海海事大学研究生创新基金项目(2016ycx074); 上海海事大学优秀博士论文培育项目(2016BXL005).

作者简介: 徐朗(1990—), 男, 博士生, 从事低碳供应链的研究; 汪传旭(1967—), 男, 教授, 博士生导师, 从事物流与供应链管理研究.

†通讯作者. E-mail: jerry_langxu@yeah.net

和实际管理的新课题。

目前,供应链减排已成为学术界研究的热点,特别是从定价和减排策略开展的研究.谢鑫鹏等^[4]研究了多制造商与单供应商组成的供应链系统生产及交易决策问题,通过主从博弈模型得到了均衡解.徐春明等^[5]针对单制造商和单零售商的供应链,考虑了需求受价格和减排率影响下的供应链决策与利润问题.Liu等^[6]考虑下游零售商通过低碳宣传等方式刺激消费者需求,从而提高消费者的环保意识,并使得供应链成员利润增加.Clara等^[7]研究了企业对排污技术投资行为的决策问题,并通过算例分析发现技术投资水平仅取决于企业自身的技术特征的影响.宋之杰等^[8]讨论了双寡头制造商的最优碳排放量和定价策略,为企业主动碳减排最优策略选择制定提供决策依据.上述文献大多是在单渠道销售情况下对供应链企业的定价和减排决策进行的研究,并未考虑到网络直销渠道对供应链渠道结构的影响.

针对双渠道供应链的协调策略,主要从契约设计方面进行深入研究,主要包括分担契约、共享契约、回购契约、谈判契约和数量折扣契约等.禹爱民等^[9]考虑联合促销和随机需求的情况,对供应链提出了基于回购契约的协调机制,发现制造商分担促销成本的比例与零售商促销的努力程度呈正相关关系.Seong等^[10]构建了数量折扣模型,认为制造商采取折扣契约可以减少双渠道冲突,提高供应链整体利润.Chiang等^[11]在考虑库存水平和产品可替代性的条件下,构建了一种供应链协调组合策略,但该策略不能同时保证成员利润实现Paroto改进.上述文献仅针对供应链进行了简单的契约机制设计,并未实现供应链的完美协调.针对这一问题,Xu等^[12]根据双渠道供应链的特点,结合收益共享和固定批发价两种契约机制对供应链进行协调,并通过计算契约参数取值范围论证协调契约完美共赢的可行性,但仅在需求具有价格敏感性条件下进行分析.

本文在渠道冲突和利润优化的双重约束下,以双渠道供应链为研究对象,探讨再制造情况下的集中决策和分散决策,在此基础上从成本和收益角度提出两种契约机制.以集中决策为协调的标杆,分散决策为协调的基准,比较两种传统的契约机制,并对原有的契约机制进行改进,从而实现供应链的完美协调.

1 模型描述与假设

1.1 模型描述

考虑由单一制造商 m 和单一再制造商 r 组成的两级供应链,制造商处于垄断地位,可以通过直销渠

道和再制造渠道进行产品销售.在供应链系统中,制造商和再制造商分别是供应链的主导者和跟随者,且进行Stackelberg博弈.在直销渠道中,制造商将直接以价格 w 将产品销售给消费者,消费者购买的产品仅具有基本使用价值;在再制造渠道中,制造商以价格 p_1 将产品批发给再制造商,再制造商对其进行减排处理后以价格 p_2 再将产品销售给消费者,消费者购买的产品不仅具有基本使用价值还具有绿色环保性.

1.2 模型假设

鉴于直销和再制造渠道销售商品时,消费者势必会存在重合性,假设两种渠道客观上构成竞争的关系.在其他条件不变的情况下,直销渠道的需求仅受单位产品价格的影响,再制造渠道的需求受到单位产品价格和减排水平的影响^[9].设两种渠道的需求函数为

$$D_1 = (1 - \mu)a - w + \beta p_2, \quad (1)$$

$$D_2 = \mu a - p_2 + \beta w + \gamma e. \quad (2)$$

其中: D_1 为直销渠道需求, D_2 为再制造渠道需求; a 为市场潜在需求,对其进行标准化处理,令 $a = 1$; β 为两种渠道因价格差异所产生的交叉需求替代系数; μ 为消费者对渠道的偏好系数,且 $0 \leq \mu \leq 1$; γ 为减排水平对再制造渠道需求的影响程度,且 $0 \leq \gamma \leq 1$; e 为再制造商减排水平.

再制造商实施减排策略需要一定的投入,假设再制造商的减排成本是关于减排水平 e 的二次凸函数,即随着减排水平的提高需要的投入会随之大大提高.根据文献[13],再制造商减排成本函数表示为

$$C(e) = \frac{k}{2}e^2, \quad (3)$$

其中 k 为再制造商减排努力成本系数.

2 无协调机制下的供应链决策模型

2.1 集中决策分析

在集中决策模式下,双渠道供应链各方实现整体一体化,即制造商与再制造商以整个供应链的利润最大化为目标,将同时对产品的直销渠道价格、再制造渠道价格和减排水平进行联合优化.因此,集中决策下的双渠道供应链利润为

$$\pi_{sc} = D_1 w + D_2 p_2 - \frac{k}{2}e^2. \quad (4)$$

命题1 集中决策模式下,如果给定的渠道偏好系数和产品替代系数,则供应链系统的最优策略组合为 (w^C, p_2^C, e^C) ,此时两种渠道的市场需求分别为 D_1^C 、 D_2^C ,整个供应链系统的利润为 π_{sc}^C .

证明 首先,由式(4)可知集中决策下双渠道供

应链利润 π_{sc} 的海森矩阵为

$$H(w, p_2, e) = \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 \pi_{sc}}{\partial w^2} & \frac{\partial^2 \pi_{sc}}{\partial p_2 \partial w} & \frac{\partial^2 \pi_{sc}}{\partial e \partial w} \\ \frac{\partial^2 \pi_{sc}}{\partial w \partial p_2} & \frac{\partial^2 \pi_{sc}}{\partial p_2^2} & \frac{\partial^2 \pi_{sc}}{\partial e \partial p_2} \\ \frac{\partial^2 \pi_{sc}}{\partial w \partial e} & \frac{\partial^2 \pi_{sc}}{\partial p_2 \partial e} & \frac{\partial^2 \pi_{sc}}{\partial e^2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -2 & 2\beta & 0 \\ 2\beta & -2 & \gamma \\ 0 & \gamma & -k \end{bmatrix}.$$

根据 $\partial^2 \pi_{sc} / \partial w^2 < 0$ 和假设条件, 集中决策下供应链整体利润的海森矩阵是负定的, 即 π_{sc} 是关于 w 、 p_2 和 e 的联合凹函数, 供应链系统存在最优解. 分别对 π_{sc} 求关于 w 、 p_2 和 e 一阶偏导条件, 可得

$$\begin{aligned} w^C &= \frac{2k(1-\mu+\beta\mu)-\gamma^2(1-\mu)}{2[2k(1-\beta^2)-\gamma^2]}, \\ p_2^C &= \frac{k(\beta+\mu-\beta\mu)}{2k(1-\beta^2)-\gamma^2}, \\ e^C &= \frac{\gamma(\beta+\mu-\beta\mu)}{2k(1-\beta^2)-\gamma^2}. \end{aligned}$$

两种渠道的需求为

$$D_1^C = \frac{1}{2}(1-\mu), \quad D_2^C = \frac{2k\mu(1-\beta^2)+\beta\gamma^2(1-\mu)}{2[2k(1-\beta^2)-\gamma^2]},$$

供应链利润为

$$\pi_{sc}^C = \frac{2k-4k\mu(1-\beta)(1-\mu)-\gamma^2(1-\mu)^2}{4[2k(1-\beta^2)-\gamma^2]}. \quad \square$$

2.2 分散决策分析

在分散决策模式下, 制造商和再制造商是不同的利益主体, 双方分别以自身利润最大化为目标独立地进行决策. 制造商和再制造商分别是供应链博弈的主导者和跟随者, 其博弈顺序为: 首先, 制造商确定直销渠道销售价格、再制造渠道批发价格和减排水平; 然后, 再制造商确定再制造渠道销售价格. 因此, 分散决策下的制造商和再制造商利润为

$$\pi_m = D_1 w + D_2 p_1, \quad (5)$$

$$\pi_r = D_2(p_2 - p_1) - \frac{k}{2}e^2. \quad (6)$$

命题 2 分散决策模式下, 如果给定的渠道偏好系数和产品替代系数, 则供应链的最优策略组合为 (w^D, p_1^D, p_2^D, e^D) , 此时两种渠道的市场需求分别为 D_1^D 、 D_2^D , 供应链各成员的利润分别为 π_m^D 、 π_r^D .

证明 模型的博弈过程属于完全信息下的两阶段动态 Stackelberg 博弈, 其均衡解是子博弈精炼纳什均衡, 故可以通过逆序归纳法进行求解. 在直销渠道价格和再制造渠道批发价格的确定条件下, 制造商利润函数 π_r 的海森矩阵为

$$H(p_2, e) = \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 \pi_r}{\partial p_2^2} & \frac{\partial^2 \pi_r}{\partial e \partial p_2} \\ \frac{\partial^2 \pi_r}{\partial p_2 \partial e} & \frac{\partial^2 \pi_r}{\partial e^2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -2 & \gamma \\ \gamma & -k \end{bmatrix}.$$

由于 $\partial^2 \pi_r / \partial p_2^2 < 0$, 根据假设条件, 可知分散决策下再制造商利润的海森矩阵是负定的, 即 π_r 是关于 p_2 和 e 的联合凹函数, 且再制造商利润存在最优解. 分别对 π_r 求关于 p_2 和 e 的一阶偏导条件, 有

$$\begin{aligned} \bar{p}_2 &= \frac{k(a\mu + w\beta) + p_1(k - \gamma^2)}{2k - \gamma^2}, \\ \bar{e} &= \frac{\gamma(a\mu + w\beta - p_1)}{2k - \gamma^2}. \end{aligned}$$

将 \bar{p}_2 和 \bar{e} 代入制造商的利润函数, 制造商利润函数 π_m 的海森矩阵为

$$H(p_1, w) = \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 \pi_m}{\partial p_1^2} & \frac{\partial^2 \pi_m}{\partial w \partial p_1} \\ \frac{\partial^2 \pi_m}{\partial p_1 \partial w} & \frac{\partial^2 \pi_m}{\partial w^2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{2k}{2k - \gamma^2} & \beta \\ \beta & -2 + \frac{2k\beta^2}{2k - \gamma^2} \end{bmatrix}.$$

根据 $\partial^2 \pi_m / \partial p_1^2 < 0$ 和假设条件, 分散决策下的制造商利润的海森矩阵是负定的, 即 π_m 是关于 w 和 p_1 的联合凹函数, 制造商利润存在最优解. 分别对 π_m 求关于 p_1 和 w 一阶偏导条件, 可得制造商最优解

$$\begin{aligned} w^D &= \frac{k[4k(1-\mu+\beta\mu)-\gamma^2(2-2\mu+\beta\mu)]}{4k(1-\beta^2)(2k-\gamma^2)-\beta^2\gamma^4}, \\ p_1^D &= \frac{\beta(1-\mu)[4k^2(1-\gamma^2)+\gamma^4]+k\mu[4k-\gamma^2(2+\beta^2)]}{4k(1-\beta^2)(2k-\gamma^2)-\beta^2\gamma^4}. \end{aligned}$$

将 w^D 和 p_1^D 代入 \bar{p}_2 和 \bar{e} , 有

$$\begin{aligned} p_2^D &= \frac{\beta(1-\mu)[4k^2+\gamma^4(1-3k)]-2k\mu[(3-\beta^2)k-\gamma^2]}{4k(1-\beta^2)(2k-\gamma^2)-\beta^2\gamma^4}, \\ e^D &= \frac{\gamma[2\mu k + \beta\gamma^2(1-\mu) - \mu\beta^2(2k-\gamma^2)]}{4k(1-\beta^2)(2k-\gamma^2)-\beta^2\gamma^4}. \end{aligned}$$

所以, 两种渠道的需求为

$$D_1^D = \frac{2k^2(1-\beta^2)(2+\mu\beta-2\mu)-\gamma^2[2(1-\mu)+\beta(1+\mu)]}{4k(1-\beta^2)(2k-\gamma^2)-\beta^2\gamma^4}.$$

零售渠道需求为

$$D_2^D = \frac{k\beta\gamma^2(1-\mu+\mu\beta)-2\mu k^2(1-\beta^2)}{4k(1-\beta^2)(2k-\gamma^2)-\beta^2\gamma^4}.$$

各成员利润为

$$\begin{aligned} \pi_m^D &= \frac{k^2[2(1-\mu+\beta\mu)^2+(1+\beta^2)]-k\gamma^2(1-\mu)(1-\mu+\beta\mu)}{4k(1-\beta^2)(2k-\gamma^2)-\beta^2\gamma^4}, \end{aligned}$$

$$\pi_r^D = \frac{k\gamma^2[2k\mu(1-\beta^2) + \beta\gamma^2(1-\mu + \beta\mu)]^2}{2[4k(1-\beta^2)(2k-\gamma^2) - \beta^2\gamma^4]} \quad \square$$

命题3 集中决策下的供应链系统利润、直销渠道价格和减排努力水平要高于分散决策,再制造渠道价格要低于分散决策.

证明 不同决策情况下存在

$$\begin{aligned} \pi_{sc}^C - \pi_{sc}^D &= \frac{[2k(1-\beta^2) - \beta^2\gamma^2][2k\mu(1-\beta^2) + \beta\gamma^2(1-\mu)]^2}{4[2k(1-\beta^2) - \gamma^2][4k(1-\beta^2)(2k-\gamma^2) - \beta^2\gamma^4]}, \\ e^C - e^D &= \frac{\gamma(1-\beta^2)[2k\mu(1-\beta^2) + \beta\gamma^2(1-\mu)]}{[2k(1-\beta^2) - \gamma^2][4k(1-\beta^2)(2k-\gamma^2) - \beta^2\gamma^4]}, \\ p_2^C - p_2^D &= \frac{[\gamma^2 - k(1-\beta^2)][2k\mu(1-\beta^2) + \beta\gamma^2(1-\mu)]}{[2k(1-\beta^2) - \gamma^2][4k(1-\beta^2)(2k-\gamma^2) - \beta^2\gamma^4]}, \\ w^C - w^D &= \frac{\beta\gamma^2[2k\mu(1-\beta^2) + \beta\gamma^2(1-\mu)]}{[2k(1-\beta^2) - \gamma^2][4k(1-\beta^2)(2k-\gamma^2) - \beta^2\gamma^4]}. \end{aligned}$$

由假设条件可知 $\pi_{sc}^C > \pi_{sc}^D, e^C > e^D, w^C < w^D, p_2^C < p_2^D$. \square

由于供应链各成员均为理性的独立参与主体,要使制造商和再制造商的决策实现集中情况下的最优效果,需要进行有效的契约设计,消除双方偏离最优效果的动机.常见的协调机制包括收益共享、成本补贴等措施.分别就供应链双方进行协调的两种契约机制进行讨论:一种是从成本角度出发设计的补贴契约机制;另一种是从收益角度出发设计的共享契约机制.分析两种契约是否都能促使制造商提高减排的努力程度,使得分散供应链系统达到集中决策的效果.

3 不同协调机制下的供应链决策模型

3.1 成本分担契约

为了刺激制造商提高再制造渠道商品的减排水平,再制造商除按照制造商在渠道中以 p_1 的批发价格购买商品外,还要以 θ 比例补贴制造商的减排成本.因此,成本分担契约下供应链各成员的利润函数表示为

$$\pi_m = D_1 w + D_2 p_1 - \theta \frac{k}{2} e^2, \quad (7)$$

$$\pi_r = D_2(p_2 - p_1) - (1-\theta) \frac{k}{2} e^2. \quad (8)$$

命题4 当 θ 满足 $[\underline{\theta}, \bar{\theta}]$ 时,供应链在成本分担契约机制下可以实现协调.

证明 存在最优解

$$\left\{ \begin{aligned} p_1^{CS} &= (4k^2(1-\theta)^2(\mu + \beta - \mu\beta) - \beta\gamma^2(1-\mu)[k(4-5\theta) - \gamma^2] - k\gamma^2\mu[2(1-2\theta) + \beta^2]) / ((1-\beta^2)[2k(1-\theta) - \gamma^2]^2 + 2k(1-\beta^2)[2k(1-\theta)^2 - \theta\gamma^2] - \gamma^4), \\ p_2^{CS} &= (2k\mu\gamma(1-\theta)(\beta^2 + 1) + \beta\gamma^3(1-2\mu)) / ((1-\beta^2)[2k(1-\theta) - \gamma^2]^2 + 2k(1-\beta^2)[2k(1-\theta)^2 - \theta\gamma^2] - \gamma^4), \\ w^{CS} &= (k[4k(1-\theta)^2(1-\mu + \beta\mu) - \gamma^2(1-2\theta)(1-\mu + \beta\mu)]) / ((1-\beta^2)[2k(1-\theta) - \gamma^2]^2 + 2k(1-\beta^2)[2k(1-\theta)^2 - \theta\gamma^2] - \gamma^4), \\ e^{CS} &= (4k^2(1-\theta)^2(1-\mu + \mu\beta) + k\gamma^2[2(1-\mu) + \beta(\mu\beta - \beta + \mu)]) / ((1-\beta^2)[2k(1-\theta) - \gamma^2]^2 + 2k(1-\beta^2)[2k(1-\theta)^2 - \theta\gamma^2] - \gamma^4). \end{aligned} \right.$$

将最优解分别代入制造商和再制造商的利润函数中,可以表示为成本分担系数 θ 的函数,有

$$\left\{ \begin{aligned} \pi_m(\theta) &= (2k^2(1-\beta)[(1-\beta)(1-\mu)^2 + \mu^2(1-\beta)^2] - k\gamma^2(1-\mu + \mu\beta)[\theta(1-\mu) - \beta\theta\mu]) / ((1-\beta^2)[2k(1-\theta) - \gamma^2]^2 + 2k(1-\beta^2)[2k(1-\theta)^2 - \theta\gamma^2] - \gamma^4), \\ \pi_r(\theta) &= (k(1-\theta)[2k(1-\theta) - \gamma^2][2k(1-\theta)(1-\beta^2) - \beta\gamma^2(1-\mu + \beta\mu)]^2) / ((1-\beta^2)[2k(1-\theta) - \gamma^2]^2 + 2k(1-\beta^2)[2k(1-\theta)^2 - \theta\gamma^2] - \gamma^4). \end{aligned} \right.$$

当制造商和再制造商利润满足 $\pi_m(\theta) \geq \pi_m^D, \pi_r(\theta) \geq \pi_r^D$ 时,供应链才实现协调,此时,存在协调参数的上下界为

$$\left\{ \begin{aligned} \underline{\theta} &= 0, \\ \bar{\theta} &= (4\beta k[2\beta\gamma^2 k(1-\mu + \beta\mu)^2 + \mu(1-\mu)(1-\beta^2)(4k-\gamma^2)] - \beta^2\gamma^4(2-\mu + \beta\mu)^2) / (2k[4\beta\mu(1-\mu)(2k-2\beta^2 k + \beta^2\gamma^2) + 4k\mu^2(1-\beta^4) + \beta^2\gamma^2(2+2\mu^2-4\mu + \beta^2\mu^2)]). \end{aligned} \right.$$

命题得证. □

命题 5 无论 θ 取何值, 制造商都不能通过成本分担契约激励再制造商将减排水平达到集中决策.

证明 由命题 4 可知, 再制造商最优减排水平为

$$e^{CS}(\theta) = \frac{4k^2(1-\theta)^2(1-\mu+\mu\beta)+}{(1-\beta^2)[2k(1-\theta)-\gamma^2]^2+} \rightarrow \leftarrow \frac{k\gamma^2[2(1-\mu)+\beta(\mu\beta-\beta+\mu)]}{2k(1-\beta^2)[2k(1-\theta)^2-\theta\gamma^2]-\gamma^4}.$$

若要实现完美协调, 则减排水平应达到集中决策 $e^{CS}(\theta) = e^C$, 即

$$\theta_1^* = \frac{2k[2\beta(1-\mu)+\mu(1+\beta^2)]-\beta\gamma^2(1-\mu)}{4k(\beta+\mu-\beta\mu)}.$$

但制造商通过衡量成本分担比例对自身利润的影响, 有

$$\theta_2^* = \frac{2k[3(\beta+\mu-\beta\mu)+\beta(1-\mu+\beta\mu)]-\beta\gamma^2(3-3\mu+\beta\mu)}{2k[3(\beta+\mu-\beta\mu)+\beta(1-\mu+\beta\mu)]}.$$

可以发现, 理想状态下的分担比例与制造商最优状态下的分担比例是不一致的, 即 $\theta_1^* \neq \theta_2^*$, 故制造商不可能提供满足条件的成本分担比例来实现供应链达到完美协调. □

3.2 收益共享契约

为了刺激制造商提高再制造渠道商品的减排水平, 制造商获得双渠道收益的 η 比例, 再制造商获得双渠道收益的 $1-\eta$ 比例. 收益共享契约下供应链各成员的利润函数可以表示为

$$\pi_m = \eta(D_1w + D_2p_2), \tag{9}$$

$$\pi_r = (1-\eta)(D_1w + D_2p_2) - \frac{k}{2}e^2. \tag{10}$$

命题 6 当 η 满足 $[\eta, \bar{\eta}]$ 时, 供应链在成本分担契约机制下可以实现协调.

证明 存在最优解

$$\begin{cases} p_2^{RS} = \frac{k(\beta+\mu-\beta\mu)(2k-\gamma^2-\eta\gamma^2)}{(2k-\gamma^2-\eta\gamma^2)^2-4\beta^2k^2}, \\ w^{RS} = \frac{(1-\eta)(2k-\gamma^2-\eta\gamma^2)^2-4\beta k^2\mu}{2[(2k-\gamma^2-\eta\gamma^2)^2-4\beta^2k^2]}, \\ e^{RS} = \frac{\gamma(1-\eta)(\beta+\mu-\beta\mu)(2k-\gamma^2-\eta\gamma^2)}{2[(2k-\gamma^2-\eta\gamma^2)^2-4\beta^2k^2]}. \end{cases}$$

将最优解分别代入制造商和再制造商的利润函数中, 可以表示为收益共享比例 η 的函数, 有

$$\begin{aligned} \pi_m(\eta) = & \eta[(1-\mu)^2(2k-\gamma^2-\eta\gamma^2)^2- \\ & 4k^2\mu(\mu-2\beta+2\beta\mu)]/ \\ & (4[(2k-\gamma^2-\eta\gamma^2)^2-4\beta^2k^2]), \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \pi_r(\eta) = & ((1-\eta)[(1-\mu)^2(2k-\gamma^2-\eta\gamma^2)^2- \\ & 4k^2\mu(\mu-2\beta+2\beta\mu)]/ \\ & (4[(2k-\gamma^2-\eta\gamma^2)^2-4\beta^2k^2]). \end{aligned}$$

当制造商和再制造商利润满足 $\pi_m(\eta) \geq \pi_m^D$, $\pi_r(\eta) \geq \pi_r^D$ 时, 供应链才实现协调, 此时, 存在协调参数的上下界为

$$\begin{cases} \eta = \frac{(1-\mu)^2[16k^3(1-\beta^2)-\beta^2\gamma^6]+6k\gamma^4(1-\beta^2)(1+\mu^2)}{8k\mu[k\mu(1-\beta^4)-\beta(1-\mu)(2k-2\beta^2k+\beta^2\gamma^2)]}, \\ \bar{\eta} = \frac{[16k^3(1-\beta^2)-\beta^2\gamma^6]-2k\gamma^4(1-\beta^2)(1+\mu^2)}{8k\mu[k\mu(1-\beta^4)-\beta(1-\mu)(2k-2\beta^2k+\beta^2\gamma^2)]}. \end{cases}$$

命题得证. □

命题 7 无论 η 取何值, 制造商都不能通过收益共享契约激励再制造商将减排水平达到集中决策.

证明 由命题 6 可知, 收益共享契约最优减排率

$$e^{CS}(\eta) = \frac{\gamma(1-\eta)(\beta+\mu-\beta\mu)(2k-\gamma^2-\eta\gamma^2)}{2[(2k-\gamma^2-\eta\gamma^2)^2-4\beta^2k^2]}.$$

同时, 若要实现供应链完美协调, 则减排水平应达到集中决策 $e^{RS}(\eta) = e^C$, 即

$$\eta_1^* = \frac{\Delta + \sqrt{\Delta^2 - \nabla\gamma^2(1-\beta^2)}}{\nabla\gamma^2(1-\beta^2)},$$

其中

$$\begin{aligned} \Delta = & \beta(1-\mu)(1-\beta^2)[8k(k-2\gamma^2)^2 + \gamma^2(k- \\ & \gamma^2)(4k+\gamma^2)] + k\mu(2-\beta^2)(2k-\gamma^2)^2, \\ \nabla = & \beta(1-\mu)[4k^2 + (2k-\gamma^2)^2] + \mu(4k^2 - \gamma^2). \end{aligned}$$

但制造商通过衡量收益共享比例对自身利润的影响, 可得 $\eta_2^* = 1$. 可以发现, 理想状态下的共享比例与制造商最优状态下的共享比例是不一致的, 即 $\eta_1^* \neq \eta_2^*$, 故制造商不可能提供满足条件的收益共享比例来实现供应链达到完美协调. □

上述命题表明, 无论是成本分担契约还是收益共享契约, 虽然能够在一定程度上协调供应链, 但无法实现系统的完美协调, 故仅从成本或收益的角度对制造商进行激励是不够的. 考虑结合成本和收益, 采取相应的措施降低制造商减排风险, 对传统的成本分担契约进行改进, 即设计一种改进的协调契约使得再制造商既共享收益又分担减排成本, 分析能否刺激各成员决策实现供应链的完美协调.

4 改进的成本分担-收益共享契约

为了实现系统协调, 达到最优的减排水平, 可以采用成本分担和收益共享的组合契约来实现供应链

的完美协调. 在该契约下, 以供应链集中决策情况作为系统协调的标杆, 分散决策情况作为系统协调的基准, 对集中决策下供应链收益进行分配, 制造商获得 $1 - \theta$ 比例的收益, 再制造商获得 θ 比例的收益; 同时, 制造商承担减排成本的 $1 - \eta$ 比例, 再制造商承担减排成本的 η 比例. 根据以上假设, 基于成本分担和收益共享的改进供应链协调机制模型可以表示为

$$\pi_m = \eta(D_1w + D_2p_2) - \theta \frac{k}{2} e^2, \quad (11)$$

$$\pi_r = (1 - \eta)(D_1w + D_2p_2) - (1 - \theta) \frac{k}{2} e^2. \quad (12)$$

命题8 在改进的成本分担-收益共享协调机制, 当 $\theta = \eta = \Omega$ 时, 供应链可以实现完美协调, 即达到集中决策.

证明 如传统契约所证, 存在最优解

$$\left\{ \begin{aligned} p_2^{RS} &= \frac{(k\eta(1-\theta)(\beta + \mu - \beta\mu)[2k(1-\theta) - \gamma^2(1-\eta)]) / [-2pt](4k^2\eta(1 - \mu + \beta\mu)(1 - \theta)^2 - 2k\gamma^2[2\eta(1 - \theta) - \beta^2\theta(1 - \eta)] + \gamma^4\eta(1 - \eta)^2),}{(4k^2\eta(1 - \mu + \beta\mu) - 2k\gamma^2(1 - \eta)[\beta\theta\mu(1 - \eta) + 2\eta(1 - \theta)] + \gamma^2\eta(1 - \eta)^2) / (4k^2\eta(1 - \mu + \beta\mu)(1 - \theta)^2 - 2k\gamma^2[2\eta(1 - \theta) - \beta^2\theta(1 - \eta)] + \gamma^4\eta(1 - \eta)^2),} \\ w^{CS} &= \frac{(\gamma\eta(1-\eta)(\beta + \mu - \beta\mu)[2k(1-\theta) - \gamma^2(1-\eta)]) / (4k^2\eta(1 - \mu + \beta\mu)(1 - \theta)^2 - 2k\gamma^2[2\eta(1 - \theta) - \beta^2\theta(1 - \eta)] + \gamma^4\eta(1 - \eta)^2),}{2k\gamma^2[2\eta(1 - \theta) - \beta^2\theta(1 - \eta)] + \gamma^4\eta(1 - \eta)^2).} \\ e^{CS} &= \end{aligned} \right.$$

若要实现供应链完美协调, 则制造商的减排水平应达到集中决策, 所以必有 $e^{IC} = e^C, \theta = \eta = \Omega$. 此时, 协调后的减排水平具有唯一性, 制造商和再制造商的利润函数分别为

$$\left\{ \begin{aligned} \pi_m^{IC} &= \frac{\Omega[2k - 4k\mu(1 - \beta)(1 - \mu) - \gamma^2(1 - \mu)^2]}{4[2k(1 - \beta^2) - \gamma^2]}, \\ \pi_r^{IC} &= \frac{(1 - \Omega)[2k - 4k\mu(1 - \beta)(1 - \mu) - \gamma^2(1 - \mu)^2]}{4[2k(1 - \beta^2) - \gamma^2]}. \end{aligned} \right.$$

可以发现, 当 $\theta = \eta = \Omega$ 时, 存在 $\pi_{sc}^{IC} = \pi_{sc}^C$, 故制造商可以提供满足条件的成本分担和收益共享比例来实现供应链达到完美协调. \square

由命题8可知, 制造商的利润随着比例 Ω 的增加递增, 再制造商的利润随着比例 Ω 的增加递减, 而 Ω 的确定受到供应链各成员参与协调意愿的约束. 即由于供应链系统利润通过比例 Ω 的变动在制造商和

再制造商之间进行分配, 若一方的利润越大, 则会造成另一方的利润越小. 只有以分散决策情况作为系统协调的基准时, 双方才会接受所提出的改进契约.

命题9 当 $\Omega^* \in [\underline{\Omega}, \bar{\Omega}]$ 时, 供应链在改进成本分担-收益共享契约机制下可以实现完美协调.

证明 在实际的供应链中, 为保证供应链各成员参与协调意愿的约束, 即利润不低于分散决策的利润, 需要满足 $\pi_m^{IC} \geq \pi_m^D, \pi_r^{IC} \geq \pi_r^D$, 供应链才实现协调. 此时, 存在协调参数的上下界为

$$\left\{ \begin{aligned} \underline{\Omega} &= (4k[2k(1 - \beta^2) - \gamma^2][2k(1 - \mu + \beta\mu)^2 - k\mu^2(1 - \beta^2) - \gamma^2(1 - \mu)(1 - \mu + \beta\mu)] / ([4k(1 - \beta^2)(2k - \gamma^2) - \beta^2\gamma^4][2k - 4k\mu(1 - \beta)(1 - \mu) - \gamma^2(1 - \mu)^2]), \\ \bar{\Omega} &= (4k[2k\mu(1 - \beta^2) + \gamma^2][2k\mu(1 - \beta^2) + \beta\gamma^2(1 - \mu + \beta\mu)] / ([4k(1 - \beta^2)(2k - \gamma^2) - \beta^2\gamma^4][2k - 4k\mu(1 - \beta)(1 - \mu) - \gamma^2(1 - \mu)^2]). \end{aligned} \right.$$

可知, 当最优比例 $\Omega^* \in [\underline{\Omega}, \bar{\Omega}]$ 时, 供应链各成员在改进的成本分担-收益共享契约机制下可以实现完美协调. \square

5 算例分析

为了进一步分析比较3种契约机制的合理性和有效性, 通过算例分析对上述命题和结论进行验证. 基于假设条件, 根据文献[4]设交叉需求替代系数 $\beta = 0.5$, 减排水平对再制造渠道需求的影响程度 $\gamma = 0.5$, 再制造商减排努力成本系数 $k = 5$, 消费者对不同渠道认知度 $\mu = 0.5$.

5.1 不同系统状态下的供应链最优解和利润

根据本文模型, 求解出不同供应链系统状态下的最优解和利润, 结果如表1所示.

表1 不同系统状态下的最优解及供应链利润

系统状态	Ω	p_1	p_2	w	e	π_m	π_r	π_{sc}
分散决策	-	4.95	6.26	5.02	0.13	2.21	0.15	2.36
集中决策	-	-	5.17	4.76	0.48	-	-	2.57
成本分担	0.706	5.10	6.43	5.08	0.454	2.24	0.16	2.40
收益共享	0.940	-	5.01	5.01	0.303	2.36	0.15	2.51
改进协调机制	0.862	-	5.17	4.78	0.48	2.21	0.45	2.57
	0.875	-	5.17	4.78	0.48	2.24	0.32	2.57
	0.900	-	5.17	4.78	0.48	2.31	0.26	2.57
	0.925	-	5.17	4.78	0.48	2.37	0.19	2.57
	0.941	-	5.17	4.78	0.48	2.41	0.15	2.57

在改进的供应链契约机制中为保持对各方的激励相容, 成本分担比例和收益共享比例应满足条件

$0.862 \leq \Omega \leq 0.941$,所以在改进契约机制下取 $\Omega = 0.862, 0.875, 0.900, 0.925, 0.941$. 由表1可见, 供应链集中决策时, 再制造商的减排水平和供应链利润均有较大提高, 而产品的最优直销价格和再制造渠道价格却比分散决策时更低. 所以, 集中决策提升了供应链整体效率. 无论供应链采取成本分担契约还是收益共享契约, 制造商的直销和再制造渠道批发价格、再制造商零售价格和减排水平都无法达到集中决策, 同时, 制造商和再制造商利润有所提高, 而供应链整体利润仍有可能得到提高.

改进的供应链契约机制实现供应链完美协调, 在达到集中决策情形下最优解的同时, 也满足激励相容约束. 随着协调系数在一定范围内增加, 制造商所占利润份额也会增加. 相应地, 再制造商的利润随之减少. 因此, 协调系数取可行性范围内最小值对再制造商是最有利的, 取最大值对制造商是最有利的, 并且不会损害对方的利益. 改进的契约机制既改善了供应链的绩效, 也增加了制造商在供应链的利润份额; 对于再制造商而言, 接受契约可以降低减排成本使收益更稳定且有所改善. 该契约可以达到集中式决策的效果, 因此也显著提高了供应链的环保水平.

5.2 不同契约机制下的供应链帕累托改进

根据本文模型, 得到不同契约机制下的协调参数的上下界, 如图1和图2所示.

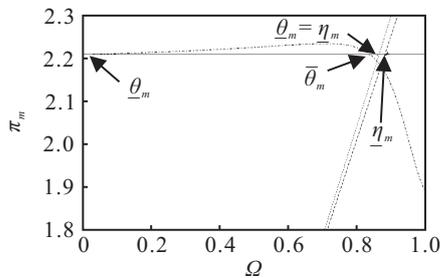


图1 不同契约机制下的制造商利润帕累托改进

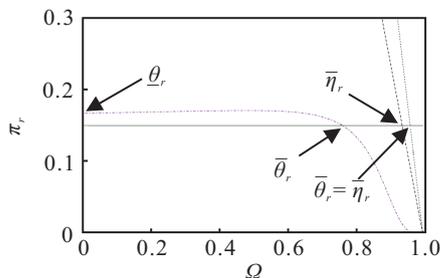


图2 不同契约机制下的再制造商利润帕累托改进

由图1和图2可见, 无论采用何种传统的契约机制, 当协调系数满足帕累托改进时, 供应链成员的利润都比分散决策高, 但较集中决策仍存在一定的差距. 在成本分担契约下, 供应链成员参与协调意愿的条件是 $\theta^* \in [\theta, \bar{\theta}]$; 在收益共享契约下, 供应链成员参

与协调意愿的条件是 $\eta^* = [\underline{\eta}, \bar{\eta}]$. 由上述命题计算可得 $\underline{\theta} = 0, \bar{\theta} = 0.808, \underline{\eta} = 0.835, \bar{\eta} = 0.975$. 同时, 制造商往往更愿意选择收益共享契约, 再制造商往往倾向于选择成本分担契约. 随着不同契约机制的协调系数增加, 成本分担契约机制下的制造商利润单调递减, 再制造商利润单调递增; 收益共享契约机制下的制造商利润单调递增, 再制造商利润单调递减.

在改进契约机制下, 供应链利润达到了集中决策下系统的利润. 虽然改进契约机制能够使得再制造减排水平达到系统最优, 但该契约不是在所有情况下均能实现供应链成员利润的帕累托改进. 改进的契约机制中制造商和再制造商参与协调意愿的条件是 $\Omega^* \in [\underline{\Omega}, \bar{\Omega}]$, 同样可计算得 $\underline{\Omega} = 0.862, \bar{\Omega} = 0.941$. 通过比较3种契约机制下的制造商和再制造商利润大小, 发现当协调系数 Ω 处在区间 $[0.86, 0.94]$ 时, 改进契约机制下制造商和再制造商利润均高于两种传统契约机制下的对应值. 此时, 改进契约机制无论从再制造商的减排水平, 还是从供应链利润都实现了完美协调.

5.3 改进契约机制下的协调系数的变化

根据本文模型, 得到改进的成本分担-收益共享的上下界与相关参数的变化趋势如图3所示.

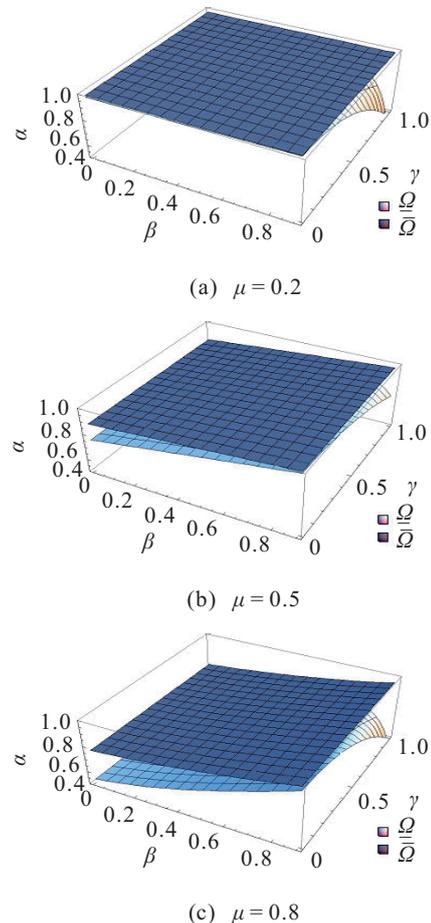


图3 成本分担-收益共享的上下界与相关参数变化趋势

由图3可见,改进契约机制下协调系数的变化范围与再制造渠道接受程度 μ 呈正向关系,即随着再制造渠道接受程度的提高,协调系数可行范围逐渐增大.无论再制造渠道接受程度如何变化,当 $\beta \rightarrow 1$, $\gamma \rightarrow 1$ 时,协调系数的可行范围最大;当 $\beta \rightarrow 1$, $\gamma \rightarrow 0$ 时,协调系数的可行范围最小.同时,改进契约机制下协调系数的变化范围还受交叉需求替代系数 β 和消费者对减排水平认知度 γ 的影响.随着交叉需求替代系数的增强,协调系数的上限 $\Omega(\overline{})$ 变化不显著,下限 $\Omega(\underline{})$ 明显提高;随着减排水平认知度的提升,协调系数的上限 $\Omega(\overline{})$ 单调递增,下限 $\Omega(\underline{})$ 单调递减.

6 结论

本文通过构建由单一制造商与单一再制造商组成的双渠道供应链决策模型,研究了集中和分散决策下的供应链成员最优决策和利润.在此基础上,分别从成本分担和收益共享角度设计了供应链契约机制,并探讨其是否能实现供应链的完美协调.通过模型比较和算例分析,可以得到如下结论:1)虽然传统的契约机制能有效地提高供应链的利润,但因为仅从成本或收益的角度对制造商进行激励是不够的,所以传统的契约机制无法实现供应链的完美协调;2)改进的成本分担-收益共享契约考虑了现有协议的不足之处,从成本和收益两个角度出发能够更有效地实现系统完美协调;3)同时论证了改进契约机制下协调系数的变化范围与再制造渠道接受程度呈正向关系,同时还受到减排水平和价格差异对需求影响.通过对本文的分析,能更好地开展双渠道供应链减排行为的对策研究.

随着政府对碳排放的财政手段多样化,供应链企业决策受到政府政策的影响,今后可以进一步引入政府的碳减排政策开展研究.本文在构建模型时仅仅考虑了确定需求情形,今后也可进一步考虑随机需求情形.

参考文献(References)

[1] Yan R, Pei Z. Retail service and firm profit in a dual-channel market[J]. *J of Retailing and Consumer Services*, 2009, 16(4): 306-314.
 [2] Wang Q P, Zhao D Z, He L F. Contracting emission reduction for supply chain considering market low-carbon preference[J]. *J of Cleaner Production*, 2016, 120(1): 72-84.

[3] 李媛, 赵道致. 收益共享寄售契约下考虑碳减排的供应链绩效[J]. *管理工程学报*, 2016, 30(3): 188-194.
 (Li Y, Zhao D Z. Supply chain performance under consignment contract with revenue sharing considering carbon emission reduction[J]. *J of Industrial Engineering and Engineering Management*, 2016, 30(3): 188-194.)
 [4] 谢鑫鹏, 赵道致. 低碳供应链生产及交易决策机制[J]. *控制与决策*, 2014, 29(4): 651-658.
 (Xie X P, Zhao D Z. Low carbon supply chain production and trading decision-making mechanism[J]. *Control and Decision*, 2014, 29(4): 651-658.)
 [5] 徐春明, 赵道致, 杜其光. 需求依赖减排水平和价格的供应链决策与协调机制[J]. *控制与决策*, 2016, 31(3): 486-492.
 (Xu C M, Zhao D Z, Du Q G. Decision and coordination models of supply chain with carbon emissions reduction level and price dependent[J]. *Control and Decision*, 2016, 31(3): 486-492.)
 [6] Liu Z, Anderso T, Cruz J. Consumer environmental awareness and competition in two-stage supply chain[J]. *European J of Operational Research*, 2012, 218(3): 602-613.
 [7] Clara P, Jessica C. On the interaction between imperfect compliance and technology adoption: Taxes versus tradable emissions permits[J]. *J of Regulatory Economy*, 2010, 38(1): 274-291.
 [8] 宋之杰, 孙其龙. 减排视角下企业的最佳研发与补贴[J]. *科研管理*, 2012, 33(10): 80-89.
 (Song Z J, Sun Q L. The optimal R&D investment and subsidy under the perspective of emission reduction[J]. *Science Research Management*, 2012, 33(10): 80-89.)
 [9] 禹爱民, 刘丽文. 随机需求和联合促销下双渠道供应链的竞争与协调[J]. *管理工程学报*, 2012, 26(1): 151-155.
 (Yu A M, Liu L W. Competing and coordination strategies for the dual channel under stochastic demand and cooperative promotion[J]. *J of Industrial Engineering and Engineering Management*, 2012, 26(1): 151-155.)
 [10] Seong Y, Hean T. Modeling hybrid distribution channels: A game-theoretic analysis[J]. *J of Retailing and Consumer Services*, 2003, 10(3): 155-167.
 [11] Chiang W. Product availability in competitive and cooperative dual-channel supply chain[J]. *European J of Operational Research*, 2010, 205(1): 113-126.
 [12] Xu G Y, Dan B, Zhang X M, et al. Coordinating a dual-channel supply chain with risk-averse under a two-way revenue sharing contract[J]. *Int J of Production Economics*, 2014, 147(1): 171-179.
 [13] Jones R, Mendelson H. Information goods vs industrial goods: Cost structure and competition[J]. *Management Science*, 2011, 57(1): 164-176.

(责任编辑: 郑晓蕾)