

政府补贴下考虑企业环保努力的 闭环供应链决策分析

孙金岭 袁朋朋

(兰州理工大学 经济管理学院,甘肃 兰州 730050)

摘要: 在消费者具有环保意识的背景下,分析有无政府补贴时制造商环保努力对各节点企业价格、需求、利润等决策的影响,并进一步探讨补贴在各类最优策略中的作用。研究表明:环保努力能提高两类产品销售价格、扩大新产品需求,但对再制品需求无影响;存在最优环保努力水平,使无政府补贴下制造商及系统整体利润最大;一定范围内补贴能遏制环保努力导致的再制品销售价格上升,但对新产品价格无影响,且对零售商来说高补贴未必能带来高收益;消费者环保意识和制造商环保努力可以通过政府补贴影响产品需求和企业收益。

关键词: 闭环供应链; 消费者环保意识; 环保努力; 政府补贴; 博弈论

文章编号: 2095-5960(2020)06-0100-10; 中图分类号: F270; 文献标识码: A

一、引言

面对日益严峻的环境污染和不可再生资源短缺问题,废弃产品回收再制造作为绿色循环发展的有效方式受到全社会广泛关注。一方面,多国纷纷出台系列政策法规,要求生产企业积极履行资源环境责任,对产品全生命周期负责,并对从事再制造的有关企业给予一定补贴支持,如“以旧换新”等政策补贴。另一方面,公众及消费者环保意识不断高涨,更加注重产品环境性能及报废处理问题。同时,对废弃产品进行有效回收和再制造又能显著降低企业生产成本提高收益,为其赢得良好声誉。^[1]鉴于此,对涉及政府、企业和消费者等多方参与的再制造闭环供应链系统展开研究具有重要的理论价值和现实借鉴。

现实中,消费者作为市场需求主体,其行为偏好与供应链中产品价格、企业利润息息相关。随着绿色发展理念深入人心,公众产品消费中的环境关切心理日益凸显,并愿意为环保支付额外费用^{[1][2]}。消费者环保意识已然成为影响企业决策的重要因素,也引起了诸多学者的关注。Conrad 采用双寡头垄断模型探讨了消费者环保意识如何对产品价格、特性及市场份额产生影响。^[2] Wang 和 Hazen 研究表明,消费者对再制造产品支付意愿不但受产品质量影响,更与产品环境属性相关。^[3] Ghosh & Shah 则基于成本共担契约研究了绿色成本及消费者环保意识两类因素对产品绿色度的影响。^[4] 刘新民等通过构建包含制造商、零售商和消费者的三方博弈模型,分析了产品价格和绿色度如何影响顾客满意度和产品定价。^[5] 曾蔚等考虑消费者对再制造产品功能及环境质量的支付意愿差异,分析了消费者绿色偏好对制造商和再制造商再制造的不同影响。^[6] 事实上,企业在生产经营活动中不仅会考虑消费者环保偏好对决策的影响,还会积极采取绿色或环保努力措施提升产品绿色环保水平,激发消费者绿色需求,并迅速扩大市场份额、提升

收稿日期: 2020-05-30

基金项目: 国家自然科学基金项目“可持续性转型视角下我国制造企业生态创新绩效评价及影响维度研究”(71763017); 甘肃省哲学社会科学项目“区域创新系统主体间耦合度与动态演化博弈研究及对兰州新区的启示”(YB063)。

作者简介: 孙金岭(1978—),男,河南平顶山人,副教授,硕士生导师,博士,研究方向为可持续供应链管理、管理决策与分析; 袁朋朋(1993—),男,安徽淮北人,硕士研究生,研究方向为物流与供应链管理。

产品竞争力。^[7-8]例如,家电领域绿色节能理念的积极倡导者海尔公司,依靠场景升级率先转型推出了符合新能效标准的节能产品。尽管企业环保努力能够助其抢占市场先机、提高企业形象和顾客满意度,但环保措施的实施也意味着企业需要进行新的绿色技术和材料设备投入,并产生更高的生产成本,从而导致环保产品市场价格提升和接受度偏低,销售困难。企业在此情况下该如何制定出最优的环保及生产和销售策略以实现收益最大化,是其面临的重要决策问题。

为改善环境,支持环保产业发展,许多政府会对生产或使用绿色、节能产品的企业和消费者给予一定补贴。在此背景下,一些学者开始致力于政府绿色或环保补贴等规制措施对供应链中有关决策影响的研究。Madani 和 Barzoki 研究了政府对绿色和非绿色产品分别实施补贴和税收规制时的最优定价问题。^[9]Yi 和 Li 考虑由一个制造商和零售商组成的供应链体系,探讨了政府对生产企业进行节能补贴和征收碳税情况下企业的最优决策。^[10]Wei 等在两个生产成本存在差异、产品价格和效能方面存在竞争的制造企业中研究了政府对节能产品补贴政策的影响作用。^[11]Zand 等则分析了政府实施的产品绿色度限制对废弃品再利用及零售商利润的影响问题。^[12]曹裕等在由制造商和零售商组成绿色供应链中,探讨了政府绿色产品补贴措施对供应链节点企业绿色努力水平及产品定价决策的作用。^[13]士明君等基于供应链中是否有信息共享两种情况,分析了政府依据产品绿色投入所实施的补贴对消费者以及节点企业决策的影响。^[14]上述研究侧重考虑了政府对绿色产品或绿色产品生产企业的规制行为,但这些研究大都是针对传统供应链中的新产品,未涉及再制造闭环供应链和对再制品进行补贴的情形。然而,与环保新产品相一致,通过对废弃产品再制造所生产的再制品本身具有更高的环保属性,是一类特殊的环保产品。其同样也存在着市场接受度不高、销售困难等问题,也迫切需要政府的支持补贴。因此,在考虑企业环保努力的再制造闭环供应链中有必要进一步纳入对政府补贴作用的分析。

综上所述,本文拟在消费者具有绿色环保意识背景下,考虑制造企业为提高产品环保水平所主动进行的环保努力行为和政府对零售商再制造产品销售补贴行为,构建无政府补贴下不考虑环保努力、无政府补贴下考虑环保努力、政府补贴下考虑环保努力三种博弈模型,求解出不同情况下模型中的最优销售及批发价格、需求数量、企业利润等决策,通过模型比较分析来探讨有无政府补贴时企业环保努力对闭环供应链中相关最优决策的可能影响,并讨论政府补贴在决策中所发挥的作用,为推动再制造产业发展和政府政策制定提供参考建议。

二、问题描述及基本假设

(一) 问题描述

如图 1 所示,基于消费者环保意识的背景,构建由单一制造商和单一零售商组成的单周期闭环供应链系统。其中,制造商为领导者,直接负责从消费者处回收废弃产品并进行再制造活动,同时制造商也负责采用原材料生产新产品,且两类产品生产成本以及为提高产品环保水平通过环保所进行的环保努力投入均由制造商承担。此外,制造商的环保努力行为能够有效提升产品的环保水平,满足产品多样化趋势,并获得绿色消费者支持,从而增加消费者对产品的价值评价。而政府则出于推动再制造产业发展目的,对零售商按照再制造产品销售数量进行补贴(简称政府补贴)。本文设定供应链中各主体信息完全对称且均以利润最大化为行动目标,建立并求解三种闭环供应链模型,进而对闭环供应链中各主体相关参数及价格、利润等决策展开分析研究。

(二) 基本假设

为便于研究,本文在结合现实情况后做出如下假设说明及符号定义:

(1) 消费者购买新产品时不出售其废弃产品,在购买再制造产品的同时出售其废弃产品,全部废弃品均能够被加工成再制造产品,单位再制品仅由单位废弃品制成,且新产品和再制造产品除环保程度之外的其他属性完全相同^[15,16]。

(2) 新产品和再制造产品单位生产成本分别为 c_n 和 c_r ,其中 $c_n > c_r > 0$, $\Delta = c_n - c_r$ 表示生产单位

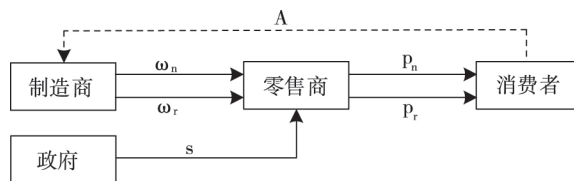


图 1 政府补贴下闭环供应链结构

再制造产品所节约的成本;单位批发价格分别为 ω_n 和 ω_r , 其中 $\omega_n > \omega_r > 0$; 单位销售价格分别为 p_n 和 p_r , 其中 $p_n > p_r > 0$ 。

(3) 参考葛静燕等的研究^[17], 设定消费者对新产品和再制造产品的支付意愿分别为 v 和 αv 。其中, v 服从 $[0, Q]$ 上的均匀分布, Q 为市场规模, α 为偏好参数, 表示现实中消费者对再造品的估价不高于新产品。但在两类产品质量、性能、服务等均相同时, α 的大小则表明了消费者对再造品的认可接受程度, 所以 α 也可以从另一个层面看成是对消费者环保意识的度量, α 越大消费者环保意识越高。

(4) 制造商环保努力成本为 $me^2/2$, $0 < m < 1$ 表示环保努力成本系数, $e \geq 0$ 为环保努力程度, 成本为二次函数以表明制造商提高环保努力水平所产生的成本是递增的。^[16, 18] 环保努力后消费者对产品的评价增量为 ke , 其中 $0 \leq k < m$ 为环保努力效率影响因子。^[18, 19]

(5) 制造商回收废弃产品的单位成本为 A , 零售商每销售一单位再制造产品所获政府补贴为 s , 其中 $0 < s < A < \Delta$ 。^[20]

依据上述假设及消费者效用理论^[21], 消费者购买新产品和再制造产品所能够获得的净效用分别为 $U_n = v + ke - p_n$ 和 $U_r = \alpha(v + ke) - p_r + A$ 。由效用最大化原理并参考相关文献中需求函数的求解方法步骤可知^[2, 20, 22], 在考虑制造商环保努力的条件下, 新产品和再制造产品需求函数分别为:

$$\begin{cases} q_n = Q - \frac{p_n - p_r + A}{1 - \alpha} + ke \\ q_r = \frac{\alpha p_n - p_r + A}{\alpha(1 - \alpha)} \end{cases} \quad (1)$$

三、模型构建与参数分析

(一) 模型构建

由假设和需求函数可依次构建三种情况下闭环供应链中制造商和零售商的利润函数模型, 分别求解出各模型中新产品和再制造产品的最优销售价格、批发价格、需求数量, 并得出节点企业及系统整体的最大化利润, 为下文比较分析做准备。在三种模型求解过程中, 制造商均作为主导方, 首先决定新产品和再制造品批发价格, 随后零售商依据制造商的决策, 制定自身对新产品与再造品销售价格。

1. 无政府补贴下不考虑环保努力(模型 NN), 闭环供应链中制造商及零售商最大化利润函数为:

$$\max \pi_m^{NN} = (\omega_n - c_n) \left(Q - \frac{p_n - p_r + A}{1 - \alpha} \right) + (\omega_r - c_r - A) \frac{\alpha p_n - p_r + A}{\alpha(1 - \alpha)} \quad (2)$$

$$\max \pi_r^{NN} = (p_n - \omega_n) \left(Q - \frac{p_n - p_r + A}{1 - \alpha} \right) + (p_r - \omega_r) \frac{\alpha p_n - p_r + A}{\alpha(1 - \alpha)} \quad (3)$$

由于闭环供应链为完全信息博弈, 在无政府补贴不考虑企业环保努力水平时, 式(2)和式(3)分别是关于 $\omega_n, \omega_r, p_n, p_r$ 的严格凹函数, 借助逆向归纳法求解即可得此基础模型均衡解, 结果见表1。

2. 无政府补贴下考虑环保努力(模型 NE), 闭环供应链中制造商及零售商最大化利润函数为:

$$\max \pi_m^{NE} = (\omega_n - c_n) \left(Q - \frac{p_n - p_r + A}{1 - \alpha} + ke \right) + (\omega_r - c_r - A) \frac{\alpha p_n - p_r + A}{\alpha(1 - \alpha)} - \frac{me^2}{2} \quad (4)$$

$$\max \pi_r^{NE} = (p_n - \omega_n) \left(Q - \frac{p_n - p_r + A}{1 - \alpha} + ke \right) + (p_r - \omega_r) \frac{\alpha p_n - p_r + A}{\alpha(1 - \alpha)} \quad (5)$$

同理, 式(4)和式(5)分别是关于 $\omega_n, \omega_r, p_n, p_r$ 的严格凹函数, 采用逆向归纳法求解即可得模型相关均衡解, 结果见表1。

3. 政府补贴下考虑环保努力(模型 SE), 闭环供应链中制造商及零售商最大化利润函数为:

$$\max \pi_m^{SE} = (\omega_n - c_n) \left(Q - \frac{p_n - p_r + A}{1 - \alpha} + ke \right) + (\omega_r - c_r - A) \frac{\alpha p_n - p_r + A}{\alpha(1 - \alpha)} - \frac{me^2}{2} \quad (6)$$

$$\max \pi_r^{SE} = (p_n - \omega_n) \left(Q - \frac{p_n - p_r + A}{1 - \alpha} + ke \right) + (p_r - \omega_r + s) \frac{\alpha p_n - p_r + A}{\alpha(1 - \alpha)} \quad (7)$$

同理 式(6)和式(7)也分别是关于 $\omega_n, \omega_r, p_n, p_r$ 的严格凹函数,易得此种情况下模型中各参数的最优解,结果见表 1。

表 1 不同情况下闭环供应链模型均衡结果

参数	模型 NN	模型 NE	模型 SE
p_n	$\frac{c_n + 3Q}{4}$	$\frac{c_n + 3(ke + Q)}{4}$	$\frac{c_n + 3(ke + Q)}{4}$
p_r	$\frac{c_r + 4A + 3\alpha Q}{4}$	$\frac{c_r + 4A + 3\alpha(ke + Q)}{4}$	$\frac{c_r + 4A - s + 3\alpha(ke + Q)}{4}$
ω_n	$\frac{c_n + Q}{2}$	$\frac{c_n + ke + Q}{2}$	$\frac{c_n + ke + Q}{2}$
ω_r	$\frac{c_r + 2A + \alpha Q}{2}$	$\frac{c_r + 2A + \alpha(ke + Q)}{2}$	$\frac{\alpha(ke + Q) + c_r + 2A + s}{2}$
q_n	$\frac{Q(1 - \alpha) - \Delta}{4(1 - \alpha)}$	$\frac{(ke + Q)(1 - \alpha) - \Delta}{4(1 - \alpha)}$	$\frac{(ke + Q)(1 - \alpha) - \Delta - s}{4(1 - \alpha)}$
q_r	$\frac{\alpha c_n - c_r}{4\alpha(1 - \alpha)}$	$\frac{\alpha c_n - c_r}{4\alpha(1 - \alpha)}$	$\frac{\alpha c_n - c_r + s}{4\alpha(1 - \alpha)}$
π_m	$\frac{Q - c_n}{2} \times \frac{Q(1 - \alpha) - \Delta}{4(1 - \alpha)} + \frac{\alpha Q - c_r}{2} \times \frac{\alpha c_n - c_r}{4\alpha(1 - \alpha)}$	$\frac{ke + Q - c_n}{2} \times \frac{(1 - \alpha)(ke + Q) - \Delta}{4(1 - \alpha)} + \frac{\alpha(ke + Q) - c_r}{2} \times \frac{\alpha c_n - c_r}{4\alpha(1 - \alpha)} - \frac{me^2}{2}$	$\frac{ke + Q - c_n}{2} \times \frac{(ke + Q)(1 - \alpha) - \Delta - s}{4(1 - \alpha)} + \frac{\alpha(ke + Q) - c_r + s}{2} \times \frac{\alpha c_n - c_r + s}{4\alpha(1 - \alpha)} - \frac{me^2}{2}$
π_r	$\frac{Q - c_n}{4} \times \frac{Q(1 - \alpha) - \Delta}{4(1 - \alpha)} + \frac{\alpha Q - c_r}{4} \times \frac{\alpha c_n - c_r}{4\alpha(1 - \alpha)}$	$\frac{ke + Q - c_n}{4} \times \frac{(1 - \alpha)(ke + Q) - \Delta}{4(1 - \alpha)} + \frac{\alpha(ke + Q) - c_r}{4} \times \frac{\alpha c_n - c_r}{4\alpha(1 - \alpha)}$	$\frac{ke + Q - c_n}{4} \times \frac{(ke + Q)(1 - \alpha) - \Delta - s}{4(1 - \alpha)} + \frac{\alpha(ke + Q) - c_r - 3s}{4} \times \frac{\alpha c_n - c_r + s}{4\alpha(1 - \alpha)}$
π_t	$\frac{3(Q - c_n)}{4} \times \frac{Q(1 - \alpha) - \Delta}{4(1 - \alpha)} + \frac{3(\alpha Q - c_r)}{4} \times \frac{\alpha c_n - c_r}{4\alpha(1 - \alpha)}$	$\frac{3(ke + Q - c_n)}{4} \times \frac{(1 - \alpha)(ke + Q) - \Delta}{4(1 - \alpha)} + \frac{3\alpha(ke + Q) - 3c_r}{4} \times \frac{\alpha c_n - c_r}{4\alpha(1 - \alpha)} - \frac{me^2}{2}$	$\frac{3(ke + Q - c_n)}{4} \times \frac{(ke + Q)(1 - \alpha) - \Delta - s}{4(1 - \alpha)} + \frac{3\alpha(ke + Q) - 3c_r - s}{4} \times \frac{\alpha c_n - c_r + s}{4\alpha(1 - \alpha)} - \frac{me^2}{2}$

注:其中 $\alpha c_n - c_r > 0, ke + Q - c_n > 0$ 表明各个结果非负。

(二) 模型对比及参数分析

分析表 1 中的模型均衡结果。首先,探讨无政府补贴前提下制造商环保努力对新产品及再制造产品销售价格、批发价格、需求数量、企业利润等的不同影响;其次,分析政府补贴下环保努力行为导致的相关均衡策略变动情况及原因,归纳出企业最优决策和政府最优干预措施。

1. 无政府补贴时环保努力的影响性分析

为分析闭环供应链中制造商环保努力对相关决策的影响,分别对比模型 NN 和模型 NE 的均衡结果,得出如下命题:

命题 1: 相比于无环保努力的情况,制造商具有环保努力行为时闭环供应链中新产品和再制造产品最优销售价格、批发价格满足如下关系:

$$p_n^{NE} > p_n^{NN}, p_r^{NE} > p_r^{NN}, \omega_n^{NE} > \omega_n^{NN}, \omega_r^{NE} > \omega_r^{NN}.$$

证明: 相减即可证。

命题 1 表明,在制造商具有环保努力行为时,闭环供应链中新产品和再制造产品销售价格、批发价格均上升。原因主要在于:(1) 环保努力行为提高了消费者对两类产品的整体价值评价和支付意愿,对产品价格的心理接受程度增加,零售商得以具有提高产品销售价格的机会。(2) 环保努力投入使得产品更具(3) 为最大化自身收益,并弥补环保努力成本支出,制造商会向零售商转嫁回收努力成本,导致产品批发价格和销售价格逐级上升。

命题2: 相比于无环保努力的情况, 制造商具有环保努力行为时闭环供应链中新产品和再制造产品最优需求数量满足如下关系:

$$q_n^{NE} > q_n^{NN}, q_r^{NE} = q_r^{NN}, q_n^{NE} + q_r^{NE} > q_n^{NN} + q_r^{NN}。$$

证明: 相减即可证。

命题2表明, 环保努力能扩大新产品和整体产品市场需求, 但再制造产品需求不受影响。主要原因在于: 两种产品价格增涨幅度相差不大, 且从产品全生命周期看, 制造商环保努力行为对新产品环保水平的提升作用更加显著, 也更能符合消费者的环保诉求, 因此新产品需求增加。此外, 回收再制造本身便是绿色环保行为, 而制造商环保努力在提升再制造产品环保水平方面所发挥的作用效果又难以被消费者直观感受到, 所以在不考虑其他因素影响时再制造产品需求不变。

命题3: 在无政府补贴机制时, 有无环保努力的闭环供应链中制造商、零售商以及系统整体最优利润满足如下关系:

$$\text{当 } 0 < e < \frac{2k(Q - c_n)}{4m - k^2} \text{ 时, } \pi_m^{NE} > \pi_m^{NN}; \pi_r^{NE} > \pi_r^{NN}; \text{当 } 0 < e < \frac{6k(Q - c_n)}{8m - 3k^2} \text{ 时, } \pi_t^{NE} > \pi_t^{NN}。$$

$$\text{证明: } \pi_m^{NE} - \pi_m^{NN} = \frac{ke(ke + 2Q - 2c_n)}{8} - \frac{me^2}{2} \text{ 若使 } \pi_m^{NE} > \pi_m^{NN} \text{ 则需 } ke(ke + 2Q - 2c_n) - 4me^2 > 0,$$

$$\text{既 } e < \frac{2k(Q - c_n)}{4m - k^2};$$

$$\pi_r^{NE} - \pi_r^{NN} = \frac{(ke)^2 + 2ke(Q - c_n)}{16} \text{ 由 } q_n^{NN} > 0, q_r^{NN} > 0 \text{ 知 } Q(1 - \alpha) - c_n + c_r > 0, \alpha c_n - c_r > 0,$$

因此 $Q(1 - \alpha) - c_n + c_r + \alpha c_n - c_r > 0$, 即 $Q - c_n > 0$, $\pi_r^{NE} > \pi_r^{NN}$;

$$\pi_t^{NE} - \pi_t^{NN} = \frac{3ke(ke + 2Q - 2c_n)}{16} - \frac{me^2}{2} \text{ 若使 } \pi_t^{NE} > \pi_t^{NN} \text{ 则需 } 3ke(ke + 2Q - 2c_n) - 8me^2 > 0 \text{ 即 } e$$

$$< \frac{6k(Q - c_n)}{8m - 3k^2}。$$

命题4: 分别存在环保努力水平 e_m^* 和 e_t^* , 使有无环保努力下的制造商及系统整体各自利润差值最大, 但不存在使零售商利润差值最大的环保努力水平。

证明: 结合命题3的证明过程可知。

$$\frac{\partial(\pi_m^{NE} - \pi_m^{NN})}{\partial e} = \frac{k^2e + kQ - kc_n}{4} - me \text{ 且 } \frac{\partial^2(\pi_m^{NE} - \pi_m^{NN})}{\partial e^2} = \frac{k^2 - 4m}{4} < 0 \text{ 因此令 } \frac{\partial(\pi_m^{NE} - \pi_m^{NN})}{\partial e} = 0,$$

可得环保努力水平 $e_m^* = \frac{k(Q - c_n)}{4m - k^2}$ 使 $\pi_m^{NE} - \pi_m^{NN}$ 取得最大值;

$$\text{同理: } \frac{\partial(\pi_t^{NE} - \pi_t^{NN})}{\partial e} = \frac{6k^2e + 6k(Q - c_n)}{16} - me, \frac{\partial^2(\pi_t^{NE} - \pi_t^{NN})}{\partial e^2} = \frac{6k^2 - 16m}{16} < 0, \text{因此 } e_t^* =$$

$$\frac{3k(Q - c_n)}{8m - k^2};$$

$$\frac{\partial(\pi_r^{NE} - \pi_r^{NN})}{\partial e} = \frac{2k^2e + 2k(Q - c_n)}{16} > 0, \frac{\partial^2(\pi_r^{NE} - \pi_r^{NN})}{\partial e^2} = \frac{k^2}{8} > 0 \text{ 因此 } \pi_r^{NE} - \pi_r^{NN} \text{ 随 } e \text{ 增大而增大。}$$

命题3和命题4表明: (1) 制造商环保努力行为对零售商利润始终具有促进作用, 即不存在使零售商利润最优的环保努力值。这主要在于制造商承担环保努力成本, 零售商通过“搭便车”享受了部分环保努力所带来的额外经济和商誉效益。(2) 只有环保努力水平低于某一阈值时, 制造商及闭环供应链整体才能受益于环保努力, 而该值的大小则主要受环保努力成本系数 m , 消费者对环保行为评价系数 k 以及新产品生产成本 c_n 的影响。原因在于制造商实施环保努力的实质性目的不仅在于提高产品环保属性, 更在于以最小的成本投入获取最高的消费者环保认可, 从而利于产品的销售和溢价。(3) 存在使制造商及系统整体各自利润差值最大的环保努力水平, 也即存在使无政府补贴下制造商及系统整体利润最优的环保

努力水平。

2. 政府补贴时环保努力的影响性分析

通过以上对比分析,发现制造商环保努力在增加新产品和整体产品需求的同时也导致了新产品和再制造产品销售价格的提升。现实中,由于再制造产品自身具有环保属性但销售困难,政府处于环境保护和资源节约的目的往往会对再制造产品进行补贴支持,其补贴干预行为也必然会对闭环供应链中决策产生影响。所以,本节进一步考虑政府对零售商销售再制造产品给予补贴时制造商环保努力对闭环供应链中企业价格、需求、利润等的可能影响,并分析是否存在使决策最优的政府补贴。为此,将表 1 中模型 NN 和模型 SE 的均衡结果进行对比分析,得到如下命题:

命题 5: 相较于无政府补贴下不考虑环保努力的情况,政府补贴下考虑环保努力时闭环供应链中产品最优销售价格、批发价格满足如下关系:

$$p_n^{SE} > p_n^{NN}; \text{当 } s > 3\alpha ke \text{ 时, } p_r^{SE} < p_r^{NN}; \omega_n^{SE} > \omega_n^{NN}; \omega_r^{SE} > \omega_r^{NN}。$$

证明: 相减即可证。

命题 5 表明 (1) 在政府补贴和制造商环保努力共同影响下,新产品销售价格、批发价格增加。一方面,环保努力行为提升了消费者对新产品的价值评价和支付意愿,推动了价格提升。另一方面,政府补贴并未直接作用于新产品,对其价格无显著影响。(2) 再制造产品批发价格增加,原因在于制造商通过提价来弥补自身环保努力成本支出。(3) 当政府补贴高于 $3\alpha ke$ 时,补贴机制能够有效遏制再制造产品销售价格上升,可见政府补贴能缓解制造商环保努力成本压力,增加消费者对再制造产品的评价,改变市场中两类产品的占比,从而起到推动再制造产业发展的目的。

命题 6: 相较于无政府补贴下不考虑环保努力的情况,政府奖惩下考虑环保努力时闭环供应链中新产品和再制造产品最优需求数量满足如下关系:

$$\text{当 } s < (1 - \alpha) ke \text{ 时, } q_n^{SE} > q_n^{NN}; q_r^{SE} > q_r^{NN}; q_r^{SE} + q_n^{SE} > q_r^{NN} + q_n^{NN}。$$

$$\text{证明: } q_n^{SE} - q_n^{NN} = \frac{(1 - \alpha) ke - s}{4(1 - \alpha)} \text{ 若使 } q_n^{SE} > q_n^{NN} \text{ 则需 } s < (1 - \alpha) ke;$$

$$q_r^{SE} - q_r^{NN} = \frac{s}{4\alpha(1 - \alpha)} > 0;$$

$$q_r^{SE} + q_n^{SE} - (q_r^{NN} + q_n^{NN}) = \frac{s}{4\alpha} + \frac{ke}{4} > 0。$$

命题 6 表明 (1) 政府补贴机制和企业环保努力行为有利于增加市场对再制造产品的需求。主要原因在于新产品价格上升的同时再制造产品价格下降,使得新产品和再制造产品之间市场“挤兑效应”加剧,再制造产品的价格优势更加显著。(2) 当零售商单位再制造产品所获补贴高于 $(1 - \alpha) ke$ 这一门槛时,会导致新产品需求量较无政府补贴和制造商环保努力时更低。这说明一定程度上对再制造产品的补贴会打击零售商对新产品的销售动力,加之补贴也导致了更低的再制造品销售价格,使得新产品需求下降,两类产品市场份额得到有效调节。值得注意的是,消费者环保意识 α 越高或对环保努力的评价增量 ke 越低则这一门槛条件越低。原因在于消费者环保意识越高则其选择更加环保的再制造产品的意愿越高,新产品市场需求量受再制造产品的挤兑会更加显著;而由于再制造产品本身具有环保属性,所以环保努力水平降低对新产品需求减少的影响更大。因此,政府补贴额度对新产品的影响受限于消费者环保意识和制造商环保努力。(3) 政府补贴和环保努力下新产品增加数量远高于再制造品减少数量,所以从引导消费者需求及扩大产品市场角度来说政府和制造商应各自恰当的实施补贴和环保努力。

命题 7: 与无政府补贴不考虑环保努力的情况相比,政府补贴下考虑环保努力时闭环供应链中制造商、零售商以及系统整体最优利润满足如下关系:

$$\text{当 } s > \sqrt{(\alpha c_n - c_r)^2 + \alpha(1 - \alpha)[4me^2 + ke(2c_n + 2Q - ke)]} - (\alpha c_n - c_r) \text{ 时, } \pi_m^{SE} - \pi_m^{NN} > 0;$$

$$\text{当 } 0 \leq s < \frac{1}{3} [\sqrt{(\alpha c_n - c_r)^2 + 3\alpha(1 - \alpha) ke(2Q + ke - 2c_n)} - (\alpha c_n - c_r)] \text{ 时, } \pi_r^{SE} - \pi_r^{NN} > 0;$$

$$\text{当 } s > \sqrt{(2\alpha c_n - 2c_r)^2 + \alpha(1 - \alpha)[8me^2 + 3ke(2c_n + 2Q - ke)]} - 2(\alpha c_n - c_r) \text{ 时, } \pi_i^{SE} - \pi_i^{NN} > 0。$$

证明: $\pi_m^{SE} - \pi_m^{NN} =$

$$\frac{s^2 + 2(\alpha c_n - c_r)s + 4\alpha e^2 m(\alpha - 1) - \alpha ke(c_n - c_r + Q(\alpha - 1)) - \alpha ke(c_r - \alpha c_n) - \alpha ke(a - 1)(Q - c_n + ke)}{8\alpha(1 - \alpha)}$$

若使 $\pi_m^{SE} - \pi_m^{NN} > 0$ 则需 $s^2 + 2(\alpha c_n - c_r)s + 4\alpha e^2 m(\alpha - 1) - \alpha ke(c_n - c_r + Q(\alpha - 1)) - \alpha ke(c_r - \alpha c_n) - \alpha ke(a - 1)(Q - c_n + ke) > 0$ 结合实际情况求解可得 s 取值范围。

$$\pi_r^{SE} - \pi_r^{NN} = \frac{-3s^2 + 2(c_r - \alpha c_n)s - 2\alpha ke(Q - c_n)(\alpha - 1) - \alpha k^2 e^2(\alpha - 1)}{16\alpha(1 - \alpha)}$$

若使 $\pi_r^{SE} - \pi_r^{NN} > 0$ 则需 $-3s^2 + 2(c_r - \alpha c_n)s + 2\alpha ke(Q - c_n)(1 - \alpha) + \alpha k^2 e^2(1 - \alpha) > 0$ 结合实际情况求解可得 s 取值范围。

$\pi_t^{SE} - \pi_t^{NN} =$

$$\frac{s^2 + 4(\alpha c_n - c_r)s + 8\alpha e^2 m(\alpha - 1) - 3\alpha ke(c_n - c_r + Q(\alpha - 1)) - 3\alpha ke(c_r - \alpha c_n) - 3\alpha ke(\alpha - 1)(Q - c_n + ke)}{16\alpha(1 - \alpha)}$$

若使 $\pi_t^{SE} - \pi_t^{NN} > 0$ 则需 $s^2 + 4(\alpha c_n - c_r)s + 8\alpha e^2 m(\alpha - 1) - 3\alpha ke(c_n - c_r + Q(\alpha - 1)) - 3\alpha ke(c_r - \alpha c_n) - 3\alpha ke(\alpha - 1)(Q - c_n + ke) > 0$ 结合实际情况求解可得 s 取值范围。

命题7说明 (1) 合理的政府补贴能够有效弥补制造商环保努力成本投入,提升其利润。(2) 对零售商来说政府高补贴未必一定能够带来高收益,而当补贴超出一定幅度后将导致其利润受损,主要原因在于补贴过高使得新产品需求量大幅下降,虽然再制造产品需求有所增加,但政府补贴同时还降低了再制品销售价格。因此,在上述因素综合作用下,零售商利润较不补贴时受损。(3) 当政府补贴高于某一阈值时系统整体及制造商利润均随补贴增加而增加,可见供应链中主导方利润与整体收益往往更具有一致性。其原因主要在于补贴增加了产品市场需求总量和批发价格,制造商和供应链整体利润随之增加。而为了占据更大的市场份额及收益,主导制造商会利用其先动优势率先做出其自身利润最大化的决策,零售商则必须依据制造商的决策而后决策。

(三) 数值分析

为检验上述相关命题并挖掘出更多其他特征,同时也进一步展现闭环供应链中产品价格、需求、利润的变动情况,更好地为政府及节点企业决策提供参考,本节将借助 MATLAB8.1 进行算例分析,并选取表1中模型 SE 情况下的均衡策略作为算例分析对象,探讨环保努力水平和政府补贴对模型最优解的影响。基于本领域已有相关同类研究文献对模型中各参数的赋值情况^[20-22],令参数初始化值 $Q = 1000$ 、 $c_n = 150$ 、 $c_r = 50$ 、 $A = 20$ 、 $m = 1$ 、 $k = 0.15$ 、 $\alpha = 0.6$, e 和 s 分别从0至12不断增加,其中 $e = 0$ 表示不考虑制造商环保努力, $s = 0$ 表示无政府补贴(为更好体现价格、利润等的变化趋势,图中将环保努力水平和政府补贴分别标注到60和20)。具体算例分析结果如下。

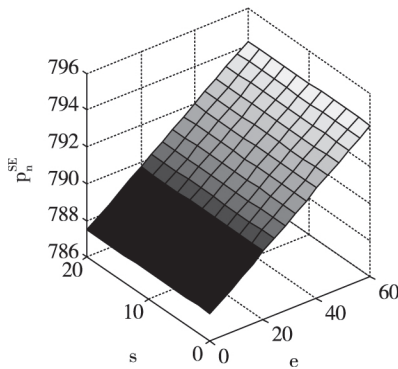


图2 e 和 s 对新产品销售价格的影响

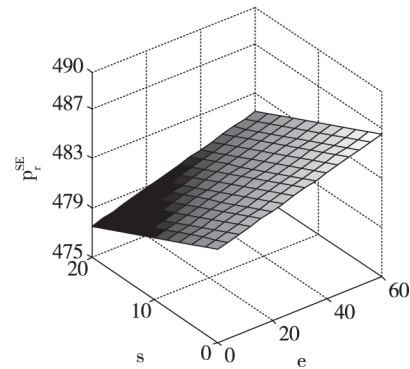


图3 e 和 s 对再制造产品销售价格的影响

分析图2和图3可知,环保努力水平对新产品和再制造产品销售价格均有提升作用。政府补贴变动对新产品价格无影响,但是再制造产品销售价格随补贴增加不断下降,政府补贴起到了遏制再造品价格上升的作用,并且当政府补贴达到某一水平后能够使再制造产品价格在与无环保努力时更低。此外,无论环保努力及政府补贴如何变化,新产品销售价格始终高于再制造产品,与现实情况相一致。

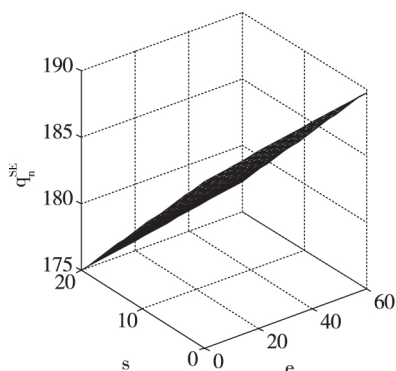


图 4 e 和 s 对新产品需求数量的影响

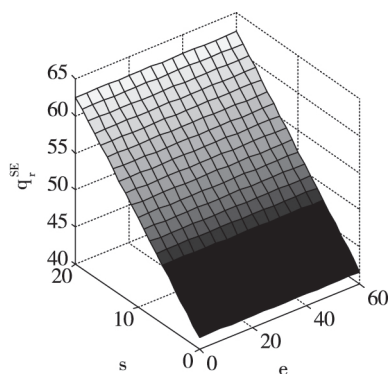


图 5 e 和 s 对再制造产品需求数量的影响

分析图 4 和图 5 可知,新产品需求与环保努力水平正相关,再制造产品需求不受环保努力影响,而政府补贴会降低新产品需求并增加再制造产品需求。可见在环保努力扩大了新产品及整体产品需求后,政府补贴能够实现对环保努力作用效果的“二次分配”,从而引导消费者产品选择。因此,政府补贴设置应合理参照制造商环保努力水平,以有效增加市场中再制造产品需求比例,从而促进生态保护和资源回收再利用。

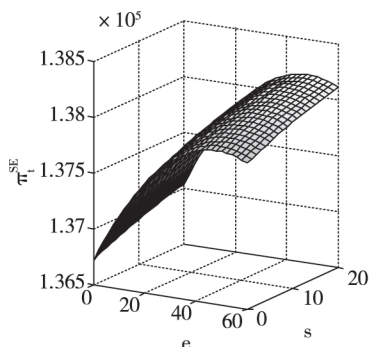


图 6 e 和 s 对系统利润的影响

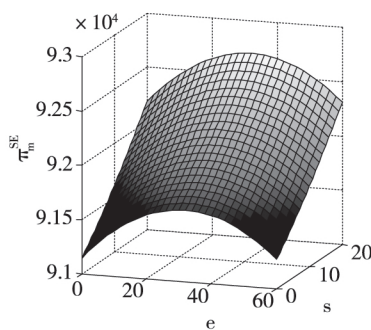


图 7 e 和 s 对制造商利润的影响

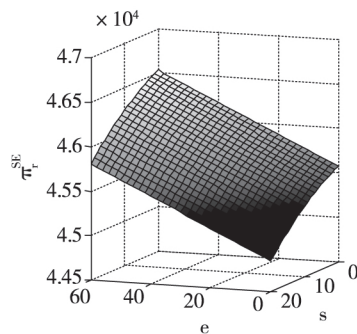


图 8 e 和 s 对零售商利润的影响

分析图 6 可知,系统利润与补贴力度同向变动,可见政府补贴对闭环供应链整体具有正向的经济效应。随着环保努力程度的增加,系统利润呈现出先升后降的变化趋势,但无论补贴如何变动,使系统利润处于最大值的环保努力水平始终无显著变化。如在政府补贴 s 分别为 0、10、20 时使闭环供应链系统利润最优的环保努力值均是 48.22。此外,随着环保努力水平的增加,闭环供应链系统利润最终会较无政府补贴不考虑环保努力时更低,但是合理的政府补贴能够减缓这一情况的出现,从而间接利于环保努力水平提升,也间接为资源回收再利用和环境保护做出了贡献。

由图 7 可知,制造商利润在环保努力水平不断提高的过程中呈现倒 U 型趋势(验证了命题 3 和命题 4),即存在使利润最大化的环保努力值,且在政府补贴 s 分别为 0、10、20 时最优的环保努力水平始终约为 32,可知政府补贴对最优的环保努力水平无显著影响。制造商利润在倒 U 形顶点急速下降的原因与环保努力成本有关,过度的环保努力导致收益增加量低于成本支出。不论环保努力水平如何,制造商利润始终随政府补贴而增加,主要原因在于政府补贴同时提升了新产品和再制造产品批发价格、再制造产品及总体产品需求,使制造商得以间接蚕食政府补贴,从而缓解了环保努力成本压力。此外,与图 6 中系统总体利润相比较,制造商利润最优时的环保努力水平处于相对较低的区域,这与制造商承担付环保努力费用密切相关,若其投入与收益比例始终失调,则此种环保努力将无法持续。因此,可以考虑由政府、制造商、零售商共同承担环保努力成本,或者对环保努力所带来的额外收益进行重新分配,以提升制造商的环保努力积极性。

图 8 反映了不同补贴力度和环保努力水平下零售商的利润变化。由图可知,制造商环保努力水平越高,零售商获利越大。主要原因是环保努力提高了新产品和再制造产品销售价格,且在再制造产品需求

不减少的同时扩大了整体产品市场需求,因此零售商利润增加。但是在环保努力水平保持不变时,相比于制造商及系统整体利润而言,随着政府补贴的增加零售商利润会快速出现减小趋势,即政府补贴仅在特定范围内才能使环保努力下零售商利润较无政府补贴也无环保努力时更高,与命题7相关结论达成一致。这也进一步说明作为补贴直接对象的零售商其利润对补贴更加敏感。

四、结论与启示

(一) 结论

1. 相比较于不考虑企业环保努力,环保努力下具有更高的新产品和再制造产品价格,相同的再制造产品及更高的新产品需求数量,这一结论显著区别于传统中认为再制造产品需求量也会随制造商环保努力而增加的常识。

2. 在环保努力对利润的影响上,不同于认为环保努力对企业当前收益无重大影响的结论^[15],本文认为作为环保努力成本承担者的制造商,其收益增减与否和环保努力程度的高低均受到努力成本及收益制约,其利润在环保努力水平不断提高的过程中呈倒U型,而零售商通过“搭便车”效应成为环保努力最大受益方,其收益随环保努力水平提高始终上升。此外,存在着最优努力值,使制造商及系统整体利润实现最大化。

3. 政府补贴无法抑制环保努力导致的新产品价格上升,但在一定补贴范围内能够有效降低再制造产品价格。同时,存在某一阈值,当补贴低于该值时新产品、再制造产品需求数量均会显著增加。值得注意的是,政府补贴虽然能够提升供应链整体利润,但未必能增加零售商收益,且整体收益与供应链中主导方利润往往更具一致性。

4. 在具有政府补贴的前提下,消费者环保意识水平的提高会加剧新产品与再制造产品之间的市场挤兑,而政府补贴额度对新产品和再制造产品需求数量所产生的影响及影响程度则会受到消费者环保意识和制造商环保努力大小的双重干扰,进而又会对供应链整体和节点企业的利润产生干扰影响。

(二) 启示

1. 制造商环保努力行为不仅有利于资源循环利用、提升企业环保商誉,而且能够增加供应链整体收益。因此,建议其积极实施环保努力策略,并依据相关条件合理设定自身努力水平。此外,制造商单独承担环保努力成本会导致其压力过大、动力不足,使闭环供应链整体收益无法实现最大化,可考虑由供应链中企业共担努力成本、共享努力收益。

2. 政府补贴有效引导了消费者对新产品和再制造产品的购买选择,促进了再制造产业发展,且在一定程度上实现了对环保努力效益的优化再分配,应长期实施。而为了缓解制造商因转嫁努力成本导致的供应链中批发及销售价格逐级上升,政府部门可在对零售商补贴的同时尝试分担制造商环保努力支出。

3. 此外,政府在制定补贴策略时需明确预期目标,参照不同目标设定补贴额度。例如,降低再制造产品价格与提高新产品需求量的最优补贴可能会处在不同范围。另外,供应链中各节点企业均会依据政府策略做出对自身最有利的选择,且策略直接承受方往往会更加敏感,因此在制定补贴等干预措施时还应当充分考虑政策作用效果的差异性和闭环供应链自身结构的特殊性。

4. 消费者主动购买是再制造产业持续发展的关键,而消费者环境意识又影响其再制造产品接受度和对回收努力行为的价值评价。因此,政府部门和企业还应当共同努力加强对废弃品回收、再制造产品销售的宣传,进一步提高消费者的环境意识,从而更好地实现资源节约和环境保护。

参考文献:

- [1]王哲,李邦义,王玥. 再制造品环境税征收政策研究[J]. 科研管理,2019,40(2):186~198.
- [2]Conrad K. Price competition and product differentiation when consumers care for the environment[J]. Environmental & Resource Economics,2005,31(1):1~19.
- [3]Wang Y, Hazen B T. Consumer product knowledge and intention to purchase remanufactured products[J]. International Journal of Production Economics,2016,181(181):460~469.
- [4]Ghosh D, Shah J. Supply chain analysis under green sensitive consumer demand and cost sharing contract[J]. Interna-

tional Journal of Production Economics ,2015 ,164: 319 ~ 329.

[5]刘新民 蔺康康 王垒. 消费者异质偏好对绿色产品定价决策的影响研究 [J]. 工业工程与管理 2018(4): 112 ~ 119.

[6]曾蔚, 马北玲, 汪继, 等. 考虑消费者绿色偏好的闭环供应链决策研究 [J]. 软科学, 2018(9): 108 ~ 113 + 118.

[7]吕宝龙, 张桂涛, 刘阳, 等. 考虑碳税和产品绿色度的闭环供应链网络 Nash 博弈均衡模型 [J]. 中国人口·资源与环境, 2019, 29(1): 59 ~ 69.

[8]Fahimnia B, Jabbarzaheh A. Marrying supply chain sustainability and resilience: a match made in heaven [J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2016, 91: 306 ~ 324.

[9]Madani S R, Rasti - Barzoki M. Sustainable supply chain management with pricing, greening and governmental tariffs determining strategies: A game - theoretic approach [J]. Computers & Industrial Engineering, 2017, 105: 287 ~ 298.

[10]Yuyin Y, Jinxi L. The effect of governmental policies of carbon taxes and energy - saving subsidies on enterprise decisions in a two - echelon supply chain [J]. Journal of Cleaner Production, 2018: 675 ~ 691.

[11]Huang W, Zhou W, Chen J, et al. The government's optimal subsidy scheme under Manufacturers' competition of price and product energy efficiency [J]. Omega - international Journal of Management Science, 2019: 70 ~ 101.

[12]Zand F, Yaghoubi S, Sadjadi S J. Impacts of government direct limitation on pricing, greening activities and recycling management in an online to offline closed loop supply chain [J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 215: 1327 ~ 1340.

[13]曹裕 寻静雅 李青松. 基于不同政府补贴策略的供应链绿色努力决策比较研究 [J]. 运筹与管理, 2020(5): 108 ~ 118.

[14]士明军 王勇 吉进迪 等. 政府补贴下绿色供应链需求预测信息共享研究 [J/OL]. [2020 - 07 ~ 13]. <https://doi.org/10.13587/j.cnki.jieem.2020.04.013>.

[15]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 [J]. 系统工程理论与实践, 2017, 37(10): 2600 ~ 2610.

[16]Guo J, Ya G. Optimal strategies for manufacturing/remanufacturing system with the consideration of recycled products [J]. Computer Industrial Engineering, 2015, 89(7): 226 ~ 234.

[17]葛静燕, 黄培清, 李娟. 社会环保意识和闭环供应链定价策略——基于纵向差异模型的研究 [J]. 工业工程与管理, 2007(4): 6 ~ 10; 24.

[18]景熠, 李成珍. 考虑企业社会责任的回收再制造定价策略 [J]. 计算机集成制造系统, 2019, 25(3): 780 ~ 790.

[19]Giovanni P D. Environmental collaboration in a closed - loop supply chain with a reverse revenue sharing contract [J]. Annals of Operations Research, 2014, 220(1): 135 ~ 157.

[20]李新然, 王奇琦. 政府补贴下考虑销售努力的闭环供应链研究 [J]. 科研管理, 2017, 38(8): 51 ~ 63.

[21]Ferguson M E, Toktay L B. The effect of competition on recovery strategies [J]. Production and Operations Management, 2006, 15(3): 352 ~ 368.

[22]肖敏 郝祯. 考虑消费者环境偏好的闭环供应链奖惩与补贴机制研究 [J]. 工业工程与管理, 2019(3): 53 ~ 59; 68.

Decision - Making Analysis of Closed - Loop Supply Chain Considering Environmental Protection Efforts of Enterprises under Government Subsidies

SUN Jin-ling, YUAN Peng-peng

(School of Economics and Management, Lanzhou University of Technology, Lanzhou, Gansu 730050, China)

Abstract: Under the background of consumers' environmental awareness, in order to analyze the impact of manufacturer's environmental protection efforts on the price, demand, profit and other decisions of node enterprises with or without government subsidies, and further explore the role of subsidies in various optimal decisions. The results show that: environmental protection efforts can increase the sales price of new products and remanufactured products, expand the demand for new products, but have no impact on the demand for remanufactured products; there is an optimal level of environmental protection efforts to maximize the profits of manufacturers and systems without government subsidies; within a certain range, subsidies can curb the increase of sales price of remanufactured products caused by environmental protection efforts, but have no impact on the price of new products, and higher subsidies may not bring higher profits to retailers; consumers' environmental awareness and manufacturers' environmental protection efforts can affect the quantity of product demand and enterprise income through government subsidies.

Key words: closed - loop supply chain; consumer environmental awareness; conservation effort; government subsidy; game theory

责任编辑: 吴锦丹