

# 不同政府目标决策下具有奖惩机制的绿色供应链模型

陈婉婷<sup>1,3†</sup>, 胡志华<sup>2</sup>, 俞超<sup>1,4</sup>

(1. 上海海事大学 经济管理学院, 上海 201306; 2. 上海海事大学 物流研究中心, 上海 201306;  
3. 海南热带海洋学院 海商学院, 海南 三亚 572022; 4. 江苏理工学院 商学院, 江苏 常州 213001)

**摘要:** 考虑由一个制造商主导和一个零售商跟随的绿色供应链, 产品销售量受价格及节能水平影响. 运用 Stackelberg 博弈理论分别构建无奖惩机制和 3 种有奖惩机制的博弈模型, 得到 4 种情形下的零售价、批发价、产品需求量、节能水平、政府节能奖惩力度及制造商和零售商利润的均衡解. 通过比较分析发现: 政府的节能奖惩机制不仅能提高产品节能水平, 还可以提升全社会福利水平; 政府综合考虑企业收益、消费者福利和环保效益的奖惩机制效果最优; 奖惩力度与产品市场规模、环境效益系数和节能水平敏感系数正相关, 与制造商节能成本投入系数、政府奖惩机制的成本投入系数、制造商单位生产成本和零售商单位销售成本负相关. 最后运用数值分析验证模型的有效性.

**关键词:** 奖惩机制; 绿色供应链; 节能水平; Stackelberg 博弈

中图分类号: F270.5

文献标志码: A

## Green supply chain model with premium and penalty mechanism under different government goals

CHEN Wan-ting<sup>1,3†</sup>, HU Zhi-hua<sup>2</sup>, YU Chao<sup>1,4</sup>

(1. School of Economics and Management, Shanghai Maritime University, Shanghai 201306, China; 2. Logistics Research Center, Shanghai Maritime University, Shanghai 201306, China; 3. School of Maritime Business, Hainan Tropical Ocean University, Sanya 572022, China; 4. School of Business, Jiangsu University of Technology, Changzhou 213001, China)

**Abstract:** A green supply chain consisting of a leading manufacturer and a following retailer is considered, whose product sales are affected by the price and the level of energy saving. Stackelberg game is applied to build a game model without premium and penalty mechanism and with three premium and penalty mechanisms. The equilibrium solutions of the four cases of retail price, wholesale price, product demand, level of energy saving, the level of government energy saving in premium and penalty and manufacturer and retailer profits are obtained. Through comparison and analysis, it is found that the government's energy saving premium and penalty mechanism can not only improve the level of product energy saving, but also improve the level of social welfare; the premium and penalty mechanism that the government takes into consideration the profit of the enterprise, the welfare of the consumer and the benefit of the environmental protection is the best; the level of premium and penalty is positively related to the product market scale, the environmental benefit coefficient and the sensitivity coefficient of energy saving, while negatively related to the cost input coefficient of the manufacturer's energy saving, the cost input coefficient of the government premium and penalty mechanism, unit production cost of the manufacturer and unit sales cost of the retailer. Finally, a numerical example is given to illustrate the effectiveness of the models.

**Keywords:** premium and penalty mechanism; green supply chain; the level of energy saving; Stackelberg game

## 0 引言

由于全球环境问题加剧, 可持续发展的概念(包括低碳经济和绿色 GDP)逐渐被政府、企业及公众广泛接受. 大多数国家把节能和环境保护作为其重要发展战略之一, 不断加强和完善相关立法, 并通过各

种行政或经济政策对企业施加影响, 引导企业开发和引入低碳节能、可持续的产品. 如: 目前全球已有 100 多个国家实施了能效标识制度, 中国也早在 2005 年 3 月 1 日起在冰箱和空调这两个产品上实施能源效率标识制度, 2016 年 6 月 1 日起施行的《新版能源

收稿日期: 2018-05-18; 修回日期: 2018-08-27.

基金项目: 国家自然科学基金项目(71471109); 上海市科学技术委员会基金项目(16040501800); 江苏高校哲学社会科学基金项目(2018SJA1727).

†通讯作者. E-mail: wontingshen@sina.cn.

效率标识管理办法》执行范围更广,更易被消费者识别,从而帮助消费者对不同产品的节能效果进行直观比较,选择购买更节能、更环保的产品.严格的法律、法规以及公众的环境保护意识迫使世界领先的商业巨头与上、下游企业合作构建绿色供应链,绿色产品在绿色供应链的发展中起着重要的作用,开发和生产绿色产品不仅可以改善环境,还可以增加企业的竞争优势.早在2001年,大众和福特汽车公司宣布实施绿色供应链管理所需的供应商和业务伙伴ISO14001认证.一些国家推出了全球禁售燃油车的时间,如德国、英国禁售燃油车政策实行时间分别为2030、2040年,跨国车企们闻风而动,大众集团计划在2030年之前投资逾200亿欧元开发电动汽车,另一德国汽车巨头戴姆勒集团计划在2022年为所有梅赛德斯-奔驰品牌车型提供电动版,沃尔沃汽车更是明确宣布自2019年开始不再生产燃油车型,全部调整为电动车型.中国很多大型制造商也努力开发、生产绿色产品,保护环境和提高竞争力.在2015米兰世博会上,格力、美的、海尔等企业向公众展示了其新推出的节能产品.吉利、长城、长安、比亚迪、奇瑞、荣威等自主车企也纷纷加快研发和推出电动汽车.可以发现,政府、上下游企业、消费者之间通过建立合作实施绿色供应链是一个不可逆转的趋势.

全社会对绿色供应链的高度关注吸引了国内外越来越多的学者.与本文相关的研究主要集中在以下两个方面:

1) 关于绿色供应链.当前一部分绿色供应链研究主要集中在案例研究、问卷调查以及其他的定性分析方法. Tseng等<sup>[1]</sup>从决策支持建模的角度,提出了不同的绿色供应链评价框架; Zhu等<sup>[2]</sup>研究了竞争下供应链中的绿色产品设计问题,探讨了产品的“绿色”是如何受到供应链结构、绿色产品类型以及竞争类型等因素的影响.另一部分绿色供应链研究集中在对策博弈、促进合作等方面.朱庆华等<sup>[3]</sup>基于产品绿色度及政府补贴构建了三个阶段供应链博弈模型,探讨了各种参数对绿色供应链中政府及生产商决策的影响; Ghosh等<sup>[4]</sup>研究了由制造商和零售商组成的二级供应链,探讨了产品的绿色化程度在讨价还价时分散决策中的影响,并进一步提出了合同协调机制; Pradipta<sup>[5]</sup>结合权力结构对绿色智能手机供应链进行了分析,认为具有主导权力的供应链成员可以获得更多的利润,但依赖于制造商的绿色投资、客户对绿化改善水平的敏感度以及对价格的敏感性; Li等<sup>[6]</sup>研究了双渠道绿色供应链,探讨了统一定价策略下的Stackelberg博弈模型,讨论了集中和分散决策情况下供应链成员的定价和绿色策略; Song等<sup>[7]</sup>考虑了消

费者对绿色产品的敏感度,通过收入共享合同来协调绿色供应链上下游成员的利益分配,并提高了绿色供应链整体绩效;徐春明等<sup>[8]</sup>考虑产品需求受价格及减排水平影响的低碳供应链,研究了3种契约下的最优决策及相关参数对供应链的影响.

2) 关于政府奖惩机制. Bansal等<sup>[9]</sup>提出了政府税收和补贴激励的不同组合,分析其对绿色制造的影响,其研究表明,在促进清洁生产时,提供补贴优于征税; Sheu等<sup>[10]</sup>研究表明,在绿色供应链中,终端客户行为和政府政策等外部性因素会影响供应链成员的协调及供应链绩效,且回收率和相应的单位补贴显著提升了绿色供应链管理绩效; Aksen等<sup>[11]</sup>研究了政府与一家从事回收业务的公司之间的补贴协议,通过构建支持性及立法性两种模型,发现在相同的回收率和收益率比例下,政府在支持性模型中给予的补贴高于立法性模型; Sheu<sup>[12]</sup>指出,政府的绿色立法和金融干预为竞争性绿色供应链的绩效和供应链成员之间的相互协调以及可持续性提供了研究机会; Hong等<sup>[13]</sup>认为提高回收价格和政府补贴可以提高逆向供应链的绩效,可通过构建模型确定逆向供应链中最优回收价格和政府最优补贴费用; 聂佳佳等<sup>[14]</sup>研究了有无奖惩机制下回收再制造闭环供应链的定价和回收决策,发现奖惩机制有利于提高制造商利润,降低零售价格及提高回收比例; 易余胤等<sup>[15]</sup>研究了不确定需求下具有奖惩机制的闭环供应链博弈模型及相关影响关系,并通过改进的收入-费用共享契约和两部收费制契约来协调闭环供应链,发现两部收费制契约的协调效果更好; 王文宾等<sup>[16]</sup>构建了无政府介入、奖惩机制及税收-补贴机制3个回收再制造决策模型,研究发现,奖惩机制在激励供应链成员回收再制造废旧产品方面效果最好; Liu等<sup>[17]</sup>通过构建4种质量价格竞争模型,考察了双渠道下政府补贴的均衡收购价格和效果,研究表明,虽然政府补贴可以支持正规部门,但在高质量废品回收方面,补贴的效果不够理想; Niu等<sup>[18]</sup>研究了可持续时装采购过程中的政府惩罚和补贴,认为可持续性与最大化社会福利的目标是相互矛盾的,需要在政府惩罚与补贴之间找到平衡.

上述文献为本文的研究提供了重要的借鉴和帮助.但现阶段关于绿色供应链鲜有结合政府奖惩机制的研究,仅有少数文献结合了政府补贴,如文献[3,9-10],对政府奖惩机制的研究大多集中在闭环供应链中,如文献[11,13-17],部分研究考虑了有无奖惩机制之间的差异及协调,如文献[15-16],且这些文献中均没有考虑到政府的不同目标决策.因此,本文考虑无奖惩及3种不同的政府目标决策下具有奖惩机制的绿色供应链模型,探讨不同政府目标决策下奖惩

机制对绿色供应链绩效及全社会福利的影响,以及奖惩力度受哪些系数影响。

## 1 问题描述及模型假设

### 1.1 问题描述

考虑由一个制造商主导和一个零售商跟随的绿色供应链,节能产品的需求量受价格及节能水平影响,根据政府4种不同的决策目标设定相应模式,研究何种政府奖励机制效果最好及其相关影响因素,为政府决策提供理论支持. 模式主要有: 1) NN模式,政府对制造商生产节能产品不进行任何奖惩; 2) EE模式,政府考虑企业(制造商和零售商)的收益并对制造商生产节能产品采取奖惩措施; 3) EC模式,政府综合考虑企业(制造商和零售商)的收益和消费者福利,并对制造商生产节能产品采取奖惩措施; 4) EP模式,政府综合考虑全社会福利,对制造商生产节能产品采取奖惩措施,全社会福利包括企业(制造商和零售商)的收益、消费者福利和环保效益。

### 1.2 模型假设

**假设1** 节能产品需求受到价格及节能水平影响,且均为线性关系,由文献[13]可得需求函数

$$d = \phi - \alpha p + \beta(\tau_x - \tau_0).$$

其中:  $\tau_x$ 表示产品的节能水平;  $\tau_0$ 表示政府奖惩的节能水平标准值;  $\phi$ 表示当价格、产品节能水平与政府奖惩节能水平标准值的差值均为0时的潜在市场规模;  $p$ 表示节能产品的价格;  $\alpha$ 表示价格影响系数,  $\beta$ 表示节能水平敏感系数,  $\alpha > \beta > 0$ . 令  $\tau = \tau_x - \tau_0$ , 需求函数变为  $d = \phi - \alpha p + \beta\tau$ . 当  $\tau > 0$ 时,政府给予制造商节能奖励,反之给予惩罚。

**假设2** 制造商为了提高产品节能水平需增加投入,需要付出成本  $g(\tau)$ , 节能水平越高,成本越高(即  $g'(\tau) > 0$ ), 此时增加幅度呈加快趋势(即  $g''(\tau) < 0$ ). 根据参考文献[13,15]的研究,假定节能成本与节能水平成二次方关系,即  $g(\tau) = \frac{1}{2}\varphi\tau^2$ , 其中  $\varphi > 0$ 是制造商的节能成本投入系数. 假设制造商的生产成本为  $c_m$ , 销售商销售成本为  $c_r$ ,  $c_m > c_r > 0$ .

**假设3** 根据参考文献[19]的研究,  $k\tau + \frac{1}{2}\eta k^2$ 为政府奖惩机制(包括监管成本)的成本,  $k > 0$ 为政府对制造商单位节能水平的奖惩力度,  $\eta$ 为政府实施奖惩机制的成本投入系数,政府为了实施奖惩机制而付出监管及其他成本等,  $\eta > 0$ .

模型主要参数及变量如表1所示。

表1 主要参数及变量说明

参数及变量	含义	参数及变量	含义
$p$	节能产品的零售价	$c_r$	零售商单位销售成本
$\omega$	节能产品的批发价	$\eta$	政府奖惩机制的成本投入系数
$\tau$	产品节能水平与政府奖惩节能水平标准值的差值	$p^{NN*}, p^{EE*}, p^{EC*}, p^{EP*}$	NN、EE、EC、EP模式下节能产品的均衡零售价
$\varphi$	节能成本投入系数	$\omega^{NN*}, \omega^{EE*}, \omega^{EC*}, \omega^{EP*}$	NN、EE、EC、EP模式下节能产品的均衡批发价
$\alpha$	价格影响系数	$d^{NN*}, d^{EE*}, d^{EC*}, d^{EP*}$	NN、EE、EC、EP模式下节能产品的均衡需求量
$\beta$	节能水平敏感系数	$\tau^{NN*}, \tau^{EE*}, \tau^{EC*}, \tau^{EP*}$	NN、EE、EC、EP模式下节能产品的均衡节能水平
$\phi$	产品潜在市场规模	$k^{EE*}, k^{EC*}, k^{EP*}$	EE、EC、EP模式下政府节能奖惩力度
$k$	政府节能奖惩力度	$\pi_m^{NN*}, \pi_m^{EE*}, \pi_m^{EC*}, \pi_m^{EP*}$	NN、EE、EC、EP模式下制造商的均衡利润
$\gamma$	环境效益系数	$\pi_r^{NN*}, \pi_r^{EE*}, \pi_r^{EC*}, \pi_r^{EP*}$	NN、EE、EC、EP模式下零售商的均衡利润
$c_m$	制造商单位生产成本		

## 2 模型构建及求解

### 2.1 政府不进行任何奖惩(NN模式)

以无政府奖惩模式为基准,根据上述模型假设情况可得制造商和零售商的利润函数如下:

$$\max \pi_m^{NN}(\omega, \tau) = (\omega - c_m)(\phi - \alpha p + \beta\tau) - \frac{1}{2}\varphi\tau^2, \quad (1)$$

$$\max \pi_r^{NN}(p) = (p - \omega - c_r)(\phi - \alpha p + \beta\tau). \quad (2)$$

模型为两阶段博弈. 博弈顺序如下: 1) 制造商决定节能产品的节能水平  $\tau$  和批发价  $\omega$ ; 2) 零售商决定节能产品价格  $p$ . 用逆向归纳法求解,可得命题如下。

**命题1** NN模式的均衡解如下:

$$\pi_r^{NN*} = \frac{\alpha\varphi^2 E^2}{A^2}, \quad (3)$$

$$\pi_m^{NN*} = \frac{\varphi E^2}{2A}. \quad (4)$$

$p^{NN*}, \omega^{NN*}, d^{NN*}, \tau^{NN*}$  的具体表达式见表2. 其中:  $A = 4\alpha\varphi - \beta^2$ ,  $E = \phi - \alpha c_m - \alpha c_r$ .

**证明** 对式(2)求  $p$  的一阶、二阶导数,由二阶导数小于零可知(2)有最大值  $p$ ,将最大值  $p$  代入(1),可得制造商目标函数

$$\pi_m^{NN} = -\frac{1}{2}\varphi\tau^2 - \frac{1}{2}(\omega - c_m)(\omega\alpha - \beta\tau - \phi + \alpha c_r). \quad (5)$$

Hessian矩阵  $H_1$  为

$$H_1 = \begin{bmatrix} -\alpha & \beta \\ \beta & -\varphi \end{bmatrix}.$$

表2 不同模式的均衡解(NN模式和EE模式)

$i$	NN	EE
$p$	$\frac{3\phi\varphi - (\beta^2 - \alpha\varphi)c_m - (\beta^2 - \alpha\varphi)c_r}{A}$	$\frac{3\phi\varphi(4\alpha(1 + \eta\varphi) - \beta^2\eta) + F(c_m + c_r)}{B}$ $F = (\beta^4\eta + 4\alpha^2\varphi(1 + \eta\varphi) - \alpha\beta^2(6 + 5\eta\varphi))$
$\omega$	$\frac{2\phi\varphi - \beta^2c_m + 2\alpha\varphi c_m - 2\alpha\varphi c_r}{A}$	$\frac{Gc_m + 2\varphi(\beta^2\eta - 4\alpha(1 + \eta\varphi))(\alpha c_r - \phi)}{B}$ $G = \beta^4\eta - 6\alpha\beta^2(1 + \eta\varphi) + 8\alpha^2\varphi(1 + \eta\varphi)$
$d$	$\frac{\alpha\varphi E}{A}$	$\frac{\alpha\varphi(\beta^2\eta - 4\alpha(1 + \eta\varphi))E}{B}$
$\tau$	$\frac{\beta E}{A}$	$\frac{\beta(\beta^2\eta - 2\alpha(3 + 2\eta\varphi))E}{B}$
$k$	-	$\frac{2\alpha\beta\varphi}{B}$
条件	$A = 4\alpha\varphi - \beta^2 > 0$	$B = \beta^4\eta + 16\alpha^2\varphi(1 + \eta\varphi) - 2\alpha\beta^2(3 + 4\eta\varphi) > 0$

当 $4\alpha\varphi - \beta^2 > 0$ 时, Hessian 矩阵  $H_1$  负定,  $\pi_m^{NN}$  为凹函数, 式(5)关于变量  $\omega$ 、 $\tau$  有极大值. 分别对式(5)求  $\omega$ 、 $\tau$  一阶偏导数, 并令其为零, 可以得到方程组, 对方程组进行联立求解可得  $\omega^{NN*}$ 、 $\tau^{NN*}$ , 继而可得  $p^{NN*}$ 、 $d^{NN*}$ . 将  $p^{NN*}$ 、 $\omega^{NN*}$ 、 $\tau^{NN*}$  代入式(1)及(2), 可得命题1结果.  $\square$

## 2.2 政府考虑企业收益及对制造商生产节能产品进行奖惩(EE模式)

与 NN 模式不同的是, EE 模式中政府作为博弈方参与进来, 而且政府决策目标是考虑企业(制造商和零售商)的收益并对制造商生产节能产品采取奖惩措施. 根据上述模型假设情况可得制造商、零售商及政府的决策目标函数分别如下:

$$\max \pi_m^{EE}(\omega, \tau) = (\omega - c_m)(\phi - \alpha p + \beta\tau) - \frac{1}{2}\varphi\tau^2 + k\tau, \quad (6)$$

$$\max \pi_r^{EE}(p) = (p - \omega - c_r)(\phi - \alpha p + \beta\tau), \quad (7)$$

$$\max \pi_g^{EE}(k) = \pi_m^{EE} + \pi_r^{EE} - k\tau - \frac{1}{2}\eta k^2. \quad (8)$$

此时模型为三阶段博弈. 博弈顺序如下: 1) 政府决定  $k$ ; 2) 制造商决定节能产品的节能水平  $\tau$  和批发价  $\omega$ ; 3) 零售商决定节能产品价格  $p$ . 用逆向归纳法求解, 可得命题2如下.

**命题2** EE模式的均衡解如下:

$$\pi_r^{EE*} = \frac{\alpha\varphi^2(\beta^2\eta - 4\alpha(1 + \eta\varphi))^2 E^2}{A^2}, \quad (9)$$

$$\pi_m^{EE*} = [\varphi(-\beta^6\eta^2 + 64\alpha^3\varphi(1 + \eta\varphi)^2 + 4\alpha\beta^4\eta(2 + 3\eta\varphi) - 4\alpha^2\beta^2(3 + 16\eta\varphi + 12\eta^2\varphi^2))E^2]/(2B^2). \quad (10)$$

$p^{EE*}$ 、 $\omega^{EE*}$ 、 $d^{EE*}$ 、 $\tau^{EE*}$ 、 $k^{EE*}$  的具体表达式见表2, 其中  $B = \beta^4\eta + 16\alpha^2\varphi(1 + \eta\varphi) - 2\alpha\beta^2(3 + 4\eta\varphi)$ .

**证明** 求  $\omega$ 、 $\tau$ 、 $p$  的过程与命题1相同, 故不再

重复证明. 将  $\omega$ 、 $\tau$ 、 $p$  代入式(8)并对其求一阶、二阶导数, 当  $B > 0$  时, 二阶导数小于零, 可得最大值  $k^{EE*}$ . 将  $k^{EE*}$  代入  $\omega$ 、 $\tau$ 、 $p$ 、 $d$  及式(7)和(8)中, 可得命题2结果.  $\square$

## 2.3 政府考虑企业收益、消费者福利及对制造商生产节能产品进行奖惩(EC模式)

与 EE 模式不同的是, EC 模式中政府决策目标是考虑企业(制造商和零售商)的收益和消费者福利, 并对制造商生产节能产品采取奖惩措施. 根据上述模型假设情况可得制造商、零售商及政府的决策目标函数分别如下:

$$\max \pi_m^{EC}(\omega, \tau) = (\omega - c_m)(\phi - \alpha p + \beta\tau) - \frac{1}{2}\varphi\tau^2 + k\tau, \quad (11)$$

$$\max \pi_r^{EC}(p) = (p - \omega - c_r)(\phi - \alpha p + \beta\tau), \quad (12)$$

$$\max \pi_g^{EC}(k) = \pi_m^{EE} + \pi_r^{EE} - k\tau - \frac{1}{2}\eta k^2 + \frac{1}{2}(\phi - \alpha p + \beta\tau)^2. \quad (13)$$

根据参考文献[20-21]的研究可知  $\frac{1}{2}(\phi - \alpha p + \beta\tau)^2$  是消费者福利.

此时模型为三阶段博弈. 博弈顺序如下: 1) 政府决定  $k$ ; 2) 制造商决定节能产品的节能水平  $\tau$  和批发价  $\omega$ ; 3) 零售商决定节能产品价格  $p$ . 用逆向归纳法求解, 可得命题3如下.

**命题3** EC模式的均衡解如下:

$$\pi_r^{EC*} = \frac{\alpha\varphi^2(\beta^2\eta - 4\alpha(1 + \eta\varphi))^2 E^2}{C^2}, \quad (14)$$

$$\pi_m^{EC*} = [\varphi(\alpha^4\beta^2 - \beta^6\eta^2 + 4\alpha\beta^4\eta(2 + 3\eta\varphi) - 4\alpha^2\beta^2(3 + 16\eta\varphi + 12\eta^2\varphi^2) + 4\alpha^3(\beta^2 + 16\varphi(1 + \eta\varphi)^2))E^2]/(2C^2). \quad (15)$$

$p^{EC*}$ 、 $\omega^{EC*}$ 、 $d^{EC*}$ 、 $\tau^{EC*}$ 、 $k^{EC*}$  具体表达式见表3, 其中  $C = \beta^4\eta - 2\alpha\beta^2(3 + 4\eta\varphi) - \alpha^2(\beta^2 - 16\varphi(1 + \eta\varphi))$ .

表3 不同模式的均衡解(EC模式和EP模式)

<i>i</i>	EC	EP
<i>p</i>	$H = \frac{3\phi\varphi(\beta^2\eta - 4\alpha(1 + \eta\varphi)) + H(c_m + c_r)}{C} = \frac{(\alpha\beta^2(6 + 5\eta\varphi) - \beta^4\eta + \alpha^2(\beta^2 - 4\varphi(1 + \eta\varphi)))}{C}$	$J = \frac{3\phi(\alpha\beta\gamma + \beta^2\eta\varphi - 4\alpha\varphi(1 + \eta\varphi)) + J(c_m + c_r)}{D} = \frac{(\beta^4\eta - \alpha\beta^2(6 + 5\eta\varphi) - \alpha^2(\beta^2 + 5\beta\gamma - 4\varphi(1 + \eta\varphi)))}{D}$
$\omega$	$I = \frac{Ic_m + 2\varphi(\beta^2\eta - 4\alpha(1 + \eta\varphi))(\alpha c_r - \phi)}{C} = \frac{(\beta^4\eta - 6\alpha\beta^2(1 + \eta\varphi) + \alpha^2(-\beta^2 + 8\varphi(1 + \eta\varphi)))}{C}$	$K = \frac{Kc_m + 2(\alpha\beta\gamma + \beta^2\eta\varphi - 4\alpha\varphi(1 + \eta\varphi))(\alpha c_r - \phi)}{D} = \frac{(\beta^4\eta - 6\alpha\beta^2(1 + \eta\varphi) - \alpha^2(\beta^2 + 6\beta\gamma - 8\varphi(1 + \eta\varphi)))}{D}$
<i>d</i>	$\frac{\alpha\varphi(4\alpha(1 + \eta\varphi) - \beta^2\eta)E}{C}$	$\frac{\alpha(4\alpha\varphi(1 + \eta\varphi) - \alpha\beta\gamma - \beta^2\eta\varphi)E}{D}$
$\tau$	$\frac{\beta(\alpha^2 - \beta^2\eta + \alpha(6 + 4\eta\varphi))E}{C}$	$\frac{\alpha^2((\beta + 4\gamma) - \beta^3\eta + 2\alpha\beta(3 + 2\eta\varphi))E}{D}$
<i>k</i>	$\frac{\alpha(2 + \alpha)\beta\varphi E}{C}$	$\frac{\alpha(\beta^2\gamma + (2 + \alpha)\beta\varphi + 4\alpha\gamma\varphi)E}{D}$
条件	$C = \beta^4\eta - 2\alpha\beta^2(3 + 4\eta\varphi) + \alpha^2(-\beta^2 + 16\varphi(1 + \eta\varphi)) > 0$	$D = \beta^4\eta - 2\alpha\beta^2(3 + 4\eta\varphi) - \alpha^2(\beta^2 + 8\beta\gamma - 16\varphi(1 + \eta\varphi)) > 0$

**证明** 求 $\omega, \tau, p$ 过程与命题1相同,故不再重复证明. 将 $\omega, \tau, p$ 代入式(13)并对其求一阶、二阶导数,当 $C > 0$ 时,二阶导数小于零,可得最大值 $k^{EC*}$ . 将 $k^{EC*}$ 代入 $\omega, \tau, p, d$ 及式(11)和(12)中,可得命题3结果. □

**2.4 政府考虑企业收益、消费者福利、环保效益及对制造商生产节能产品进行奖惩(EP模式)**

与EC模式不同的是,EP模式中政府决策目标是考虑企业(制造商和零售商)的收益、消费者福利和环保效益,并对制造商生产节能产品采取奖惩措施. 根据上述模型假设情况可得制造商、零售商及政府的决策目标函数分别如下:

$$\max \pi_m^{EP}(\omega, \tau) = (\omega - c_m)(\phi - \alpha p + \beta\tau) - \frac{1}{2}\varphi\tau^2 + k\tau, \quad (16)$$

$$\max \pi_r^{EP}(p) = (p - \omega - c_r)(\phi - \alpha p + \beta\tau), \quad (17)$$

$$\begin{aligned} \max \pi_g^{EP}(k) = & \pi_m^{EE} + \pi_r^{EE} - k\tau - \frac{1}{2}\eta k^2 + \\ & \frac{1}{2}(\phi - \alpha p + \beta\tau)^2 + \gamma\tau(\phi - \alpha p + \beta\tau). \end{aligned} \quad (18)$$

根据参考文献[22-23]的研究, $\gamma\tau(\phi - \alpha p + \beta\tau)$ 为制造商节能带来的环境效益, $\gamma$ 为制造商节能带来的环境效益系数.

此时模型为三阶段博弈. 博弈顺序如下: 1) 政府决定 $k$ ; 2) 制造商决定节能产品的节能水平 $\tau$ 和批发价 $\omega$ ; 3) 零售商决定节能产品价格 $p$ . 用逆向归纳法求解,可得命题如下.

**命题4** EP模式的均衡解如下:

$$\pi_r^{EP*} = \frac{\alpha(\alpha\beta\gamma + \beta^2\eta\varphi - 4\alpha\varphi(1 + \eta\varphi))^2 E^2}{D^2}, \quad (19)$$

$$\pi_m^{EC*} = \frac{E^2}{2D^2}((\alpha^4(\beta + 4\gamma)^2\varphi - \beta^6\eta^2\varphi + 2\alpha^3(\beta^3\gamma +$$

$$\begin{aligned} & 2\beta^2(3\gamma^2 + \varphi) + 32\varphi^2(1 + \eta\varphi)^2 - \\ & 8\beta\gamma\varphi(1 + 2\eta\varphi)) + 2\alpha\beta^4\eta(-\beta\gamma + 2\varphi(2 + \\ & 3\eta\varphi)) + 4\alpha^2\beta^2(\beta\gamma(3 + 4\eta\varphi) - \\ & \varphi(3 + 16\eta\varphi + 12\eta^2\varphi^2))). \end{aligned} \quad (20)$$

$p^{EP*}, \omega^{EP*}, d^{EP*}, \tau^{EP*}, k^{EP*}$ 的具体表达见表3,其中 $D = \beta^4\eta - 2\alpha\beta^2(3 + 4\eta\varphi) - \alpha^2(\beta^2 + 8\beta\gamma - 16\varphi(1 + \eta\varphi))$ .

**证明** 求 $\omega, \tau, p$ 过程与命题1相同,故不再重复证明. 将 $\omega, \tau, p$ 代入式(18)并对其求一阶、二阶导数,当 $D > 0$ 时,二阶导数小于零,可得最大值 $k^{EP*}$ . 将 $k^{EP*}$ 代入 $\omega, \tau, p, d$ 及式(16)和(17)中,可得命题4结果. □

**3 模型比较及管理意义分析**

为了使得上述4种模式均具有均衡解,只需要使所有的假设约束条件的共同解满足 $\varphi > \frac{-2\alpha^2 + \alpha\beta^2\eta + \sqrt{4\alpha^4 + 2\alpha^3\beta^2\eta + \alpha^4\beta^2\eta + 8\alpha^4\beta\gamma\eta}}{4\alpha^2\eta}$ 即可,由于 $\varphi$ 节能成本投入系数在现实中的值相对较大,而 $\alpha, \beta$ 均为系数,相对数值较小,假设条件也容易符合现实条件,可得推论如下.

**推论1**  $k^{EP*} > k^{EC*} > k^{EE*}$ .

**证明**

$$k^{EC*} - k^{EE*} =$$

$$\frac{\alpha^2\beta\varphi(4\alpha\varphi - \beta^2)(4\alpha(1 + \eta\varphi) - \beta^2\eta)E}{BC} > 0,$$

所以有 $k^{EC*} > k^{EE*}$ ;

$$k^{EP*} - k^{EC*} =$$

$$\frac{\alpha\gamma(4\alpha\varphi - \beta^2)(6\alpha\beta^2 - \beta^4\eta + \alpha^2(\beta^2 + 16\varphi(1 + \eta\varphi)))E}{CD} > 0,$$

所以有 $k^{EP*} > k^{EC*}$ . □

推论1表明:随着政府的决策目标从仅考虑企业收益及节能奖励到考虑到消费者福利和环保效益,政

府对制造商进行节能奖惩力度不断加大。

**推论2**  $\tau^{EP*} > \tau^{EC*} > \tau^{EE*} > \tau^{NN*}$ .

**证明**

$$\tau^{EE*} - \tau^{NN*} = \frac{8\alpha^2\beta\varphi E}{AB} > 0,$$

所以有  $\tau^{EE*} > \tau^{NN*}$ ;

$$\tau^{EC*} - \tau^{EE*} = \frac{4\alpha^3\beta\varphi(4\alpha(1+\eta\varphi) - \beta^2\eta)E}{BC} > 0,$$

所以有  $\tau^{EC*} > \tau^{EE*}$ ;

$$\tau^{EP*} - \tau^{EC*} = \frac{4\alpha^2\gamma(6\alpha\beta^2 - \beta^4\eta + \alpha^2(\beta^2 + 16\varphi(1 + \eta\varphi)))E}{CD} > 0,$$

所以有  $\tau^{EP*} > \tau^{EC*}$ .  $\square$

推论2表明:一方面,政府对制造商进行节能奖惩的机制起到了作用,有奖惩的情形均优于无奖惩的情形;另一方面,在政府的3种节能奖惩机制中,考虑企业收益、消费者福利和环保效益是3种决策机制中最优的,EP模式下制造商的节能水平最高。

**推论3**  $d^{EP*} > d^{EC*} > d^{EE*} > d^{NN*}$ .

**证明**

$$d^{EE*} - d^{NN*} = \frac{2\alpha^2\beta^2\varphi E}{AB} > 0,$$

所以有  $d^{EE*} > d^{NN*}$ ;

$$d^{EC*} - d^{EE*} = \frac{\alpha^3\beta^2\varphi(4\alpha(1+\eta\varphi) - \beta^2\eta)E}{BC} > 0,$$

所以有  $d^{EC*} > d^{EE*}$ ;

$$d^{EP*} - d^{EC*} = \frac{\alpha^2\beta\gamma(6\alpha\beta^2 - \beta^4\eta + \alpha^2(\beta^2 + 16\varphi(1 + \eta\varphi)))E}{CD} > 0,$$

所以有  $d^{EP*} > d^{EC*}$ .  $\square$

推论3表明:一方面,政府对制造商进行节能奖惩的机制促进了需求的增加;另一方面,在政府的3种节能奖惩机制中,考虑企业收益、消费者福利和环保效益是3种决策机制中最优的,EP模式下节能产品的需求量最高.虽然政府并没有对企业或消费者进行价格奖惩,但政府的奖惩机制调动了制造商节能的积极性,提高了节能水平,促进了需求量的提升,而更多的消费者接受并购买节能产品,也有利于环保及全社会福利的增加。

**推论4**  $\omega^{EP*} > \omega^{EC*} > \omega^{EE*} > \omega^{NN*}$ ,  $p^{EP*} > p^{EC*} > p^{EE*} > p^{NN*}$ .

**证明**

$$\omega^{EE*} - \omega^{NN*} = \frac{4\alpha\beta^2\varphi E}{AB} > 0,$$

所以有  $\omega^{EE*} > \omega^{NN*}$ ;

$$\omega^{EC*} - \omega^{EE*} = \frac{2\alpha^2\beta^2\varphi(4\alpha(1+\eta\varphi) - \beta^2\eta)E}{BC} > 0,$$

所以有  $\omega^{EC*} > \omega^{EE*}$ ;

$$\omega^{EP*} - \omega^{EC*} = \frac{2\alpha\beta\gamma(6\alpha\beta^2 - \beta^4\eta + \alpha^2(\beta^2 + 16\varphi(1 + \eta\varphi)))E}{CD} > 0,$$

所以有  $\omega^{EP*} > \omega^{EC*}$ ;

$$p^{EE*} - p^{NN*} = \frac{6\alpha\beta^2\varphi E}{AB} > 0,$$

所以有  $p^{EE*} > p^{NN*}$ ;

$$p^{EC*} - p^{EE*} = \frac{3\alpha^2\beta^2\varphi(4\alpha(1+\eta\varphi) - \beta^2\eta)E}{AB} > 0,$$

所以有  $p^{EC*} > p^{EE*}$ ;

$$p^{EP*} - p^{EC*} = \frac{3\alpha\beta\gamma(6\alpha\beta^2 - \beta^4\eta + \alpha^2(\beta^2 + 16\varphi(1 + \eta\varphi)))E}{CD} > 0,$$

所以有  $p^{EP*} > p^{EC*}$ .  $\square$

推论4表明:政府对制造商进行节能奖惩的机制使得节能产品的批发价和零售价均有提升,在政府的3种节能奖惩机制中,考虑企业收益、消费者福利和环保效益是3种决策机制中最优的,EP模式下节能产品的批发价和零售价最高.表面上看,节能产品的批发价和零售价损害了消费者福利,但从推论3可以发现,节能产品的需求量却是增加的,所以,总体上消费者福利是增加的.在影响需求量的两个因素(价格和节能水平)中,节能给消费者带来了更多的福利。

**推论5**  $\pi_r^{EC*} > \pi_r^{EE*} > \pi_r^{NN*}$ ,  $\pi_m^{EE*} > \pi_m^{NN*}$ .

**证明**

$$\pi_r^{EE*} - \pi_r^{NN*} = \frac{4\alpha^2\varphi^2(\beta^6\eta + 16\alpha^2\beta^2\varphi(1+\eta\varphi) - \alpha\beta^4(5+8\eta\varphi))E^2}{A^2B^2} > 0,$$

所以有  $\pi_r^{EE*} > \pi_r^{NN*}$ ;

$$\pi_r^{EC*} - \pi_r^{EE*} =$$

$$\alpha\varphi^2(\beta^2\eta - 4\alpha(1+\eta\varphi))^2E^2\left(\frac{1}{C^2} - \frac{1}{B^2}\right) > 0,$$

因为  $B^2 > C^2$ ,所以  $\pi_r^{EC*} > \pi_r^{EE*}$ ;

$$\pi_m^{EE*} - \pi_m^{NN*} =$$

$$\frac{2\alpha\beta^2\varphi(\beta^4\eta - 2\alpha\beta^2(3+4\eta\varphi) + 4\alpha^2\varphi(5+4\eta\varphi))E^2}{AB^2} > 0,$$

所以  $\pi_m^{EE*} > \pi_m^{NN*}$ .  $\square$

由于  $\pi_r^{EP*} - \pi_r^{EE*}$ ,  $\pi_m^{EP*} - \pi_m^{EC*}$ ,  $\pi_m^{EC*} - \pi_m^{EE*}$  的表达式过于复杂,无法直接进行数理证明,将在下面的算例分析中加以验证。

推论5表明:政府对制造商进行节能奖惩的机制提升了制造商和零售商的利润,且在政府的两种节能奖惩机制中,考虑企业收益、消费者福利是两种决策机制中更优的,EC模式下制造商和零售商的利润更高,大大提高了企业的积极性,有利于制造商绿色节

能技术创新,进一步提升产品的绿色节能水平.

**推论6** 奖惩力度  $k^{EP*}$  与  $\phi, \beta, \gamma$  正相关, 与  $c_m, c_r, \varphi, \eta$  负相关.

**证明** 分别对  $k^{EP*}$  求  $\phi, \beta, \gamma, c_m, c_r, \varphi, \eta$  一阶偏导. 其中  $c_m, c_r, \phi, \gamma, \eta$  均容易判断结果, 略过不证, 仅证明  $\beta, \varphi$  的一阶偏导.

$$\frac{\partial \beta}{\partial k} = E(12\alpha^2\beta^2\varphi + 8\alpha^3\beta^2\varphi + \alpha^4\beta^2\varphi + 80\alpha^3\beta\gamma\varphi + 8\alpha^4\beta\gamma\varphi + 32\alpha^4\gamma^2\varphi + 16\alpha^4\varphi^2 + 8\alpha^3\beta^2\eta\varphi^2 + 32\alpha^3\eta\varphi^3 + 16\alpha^4\eta\varphi^3 + S)/D^2,$$

其中

$$S = 96\alpha^3\beta\gamma\eta\varphi^2 - 16\alpha^2\beta^3\gamma\eta\varphi + 8\alpha^3\beta^2\eta\varphi^2 - 3\alpha^2\beta^4\eta\varphi + 16\alpha^2\beta^2\eta\varphi^2 - 6\alpha\beta^4\eta\varphi + 32\alpha^4\gamma^2\varphi - 8\alpha^3\beta^2\gamma^2 + 16\alpha^2\beta^2\eta\varphi^2 - 2\alpha\beta^5\gamma\eta > 0,$$

所以  $\frac{\partial \beta}{\partial k} > 0$ ;

$$\frac{\partial \varphi}{\partial k} = -E(12\alpha\beta^3 + 8\alpha^2\beta^3 + \alpha^3\beta^3 + 56\alpha^2\beta^2\gamma + 12\alpha^3\beta^2\gamma + 32\alpha^3\beta\gamma^2 + 64\alpha^3\gamma\eta\varphi^2 + R)/D^2,$$

其中

$$R = 32\alpha^2\beta^2\gamma\eta\varphi + 32\alpha^2\beta\eta\varphi^2 + 16\alpha^3\beta\eta\varphi^2 - 2\beta^5\eta - \alpha\beta^5\eta - 12\alpha\beta^4\gamma\eta > 0,$$

所以  $\frac{\partial \varphi}{\partial k} < 0$ .  $\square$

推论6表明:一方面,  $\phi$  越大,  $k^{EP*}$  越大, 即市场规模越大, 奖惩力度越大, 所以政府在实施具体奖惩机制时应根据节能产品的市场规模确定奖惩力度;  $\gamma$  越大,  $k^{EP*}$  越大, 即环境效益系数越大, 奖惩力度越大, 节能减排水平给社会带来的效益越明显, 政府有责任和义务提高更高的奖惩水平;  $\beta$  越大,  $k^{EP*}$  越大, 即节能产品受节能水平影响的敏感系数越大, 奖惩力度越大, 如果消费者更加注重节能环保, 则对于制造商、零售商以及全社会都是有利的, 应该予以更高的奖惩, 符合政府提倡的“绿色、节能、环保”的精神理念. 另一方面,  $c_m, c_r$  越大,  $k^{EP*}$  越小, 即制造商单位生产成本和零售商单位销售成本越大, 奖惩力度越小, 这反映了如果制造商节能成本占总成本比例较小的话, 对制造商及零售商而言均不构成负担, 无需政府给予大量补贴, 反之, 对制造商及零售商而言意义重大, 需要政府提供支持;  $\varphi$  越大,  $k^{EP*}$  越小, 即制造商的节能成本投入系数越大, 奖惩力度越小, 在达到既定节能水平的条件下, 若企业投入的多, 则政府就不需要加

大奖惩力度, 这种情况下, 企业容易钻“政策漏洞”, 比如通过向政府谎报企业节能成本投入来获得更多的政府奖惩, 这就需要政府如何甄别真实信息, 根据实际发生的情况提供相应的奖惩;  $\eta$  越大,  $k^{EP*}$  越小, 即政府实施奖惩机制的成本投入系数越大, 奖惩力度越小, 因为政府的工作都有相应的预算, 成本投入过大, 势必占用奖惩的预算额, 从而降低了奖惩力度, 这种情况下, 需要政府通过提升技术水平及提升效率等措施来降低实施奖惩机制的成本投入, 从而把更多奖惩方面的预算用到全社会福利上去, 从而提高全社会的福利.

### 4 数值分析

为检验模型的有效性, 在满足命题约束条件  $\varphi > \frac{-2\alpha^2 + \alpha\beta^2\eta + \sqrt{4\alpha^4 + 2\alpha^3\beta^2\eta + \alpha^4\beta^2\eta + 8\alpha^4\beta\gamma\eta}}{4\alpha^2\eta}$  的情况下, 通过以下数值进行分析:  $\alpha = 0.8, \beta = 0.5, \phi = 1000, \eta = 20, \varphi = 40, \gamma = 1000, c_m = 4, c_r = 2$ . 通过Mathematics软件进行计算. 图1和图2分别为  $\eta$  对EE、EC、EP模式下制造商和零售商利润的影响.

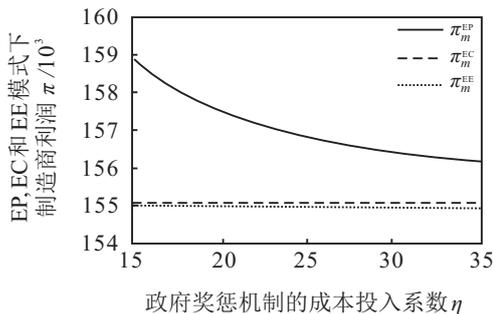


图1  $\eta$ 对EE、EC、EP模式下制造商利润的影响

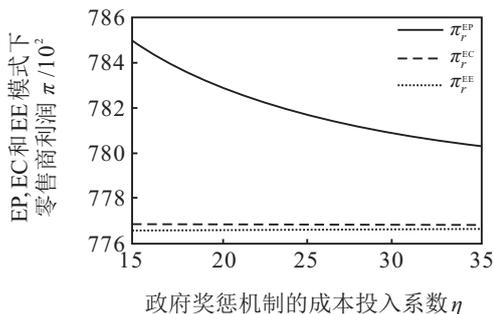


图2  $\eta$ 对EE、EC、EP模式下零售商利润的影响

由图1和图2可知, 随着政府实施奖惩机制的成本投入系数  $\eta$  的增加, EE、EC、EP模式下制造商及零售商利润都呈现下降趋势, 但EP模式的制造商及零售商利润始终明显高于EE、EC模式. 由此可见, 在政府的节能奖惩机制中, 考虑企业收益、消费者福利和环保效益是3种奖惩机制中最优的, EP模式下制造商和零售商的利润更高, 有利于制造商绿色节能技术

创新,进一步提升产品的绿色节能水平.

图3和图4分别为 $\eta, \varphi$ 对NN、EE、EC及EP模式下节能水平的影响.

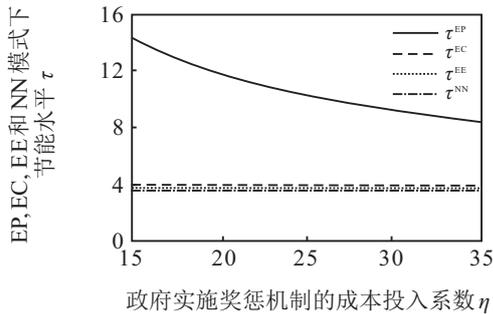


图3  $\eta$ 对NN、EE、EC、EP模式下节能水平的影响

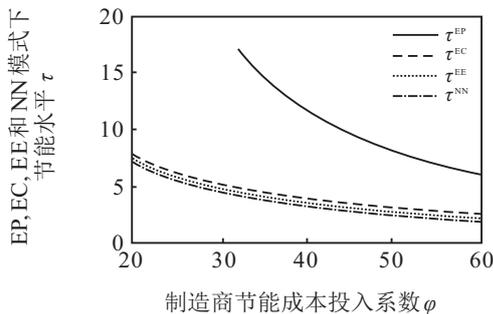


图4  $\varphi$ 对NN、EE、EC、EP模式下节能水平的影响

由图3和图4可知:一方面,随着政府实施奖惩机制的成本投入系数 $\eta$ 和制造商节能成本投入系数 $\varphi$ 的增加,NN、EE、EC及EP模式下节能水平 $\tau$ 都呈下降趋势,但EP模式节能水平 $\tau$ 始终高于其他模式,进一步说明EP模式更优;另一方面,政府可以通过提高行政管理水平及效率等措施降低奖惩机制的成本投入系数 $\eta$ ,制造商可以通过转型升级,采用技术更先进、维护成本更低的设施、设备等手段降低节能成本投入系数 $\varphi$ 来提高产品的节能水平.

图5为 $\eta$ 对NN、EE、EC及EP模式下需求量的影响.

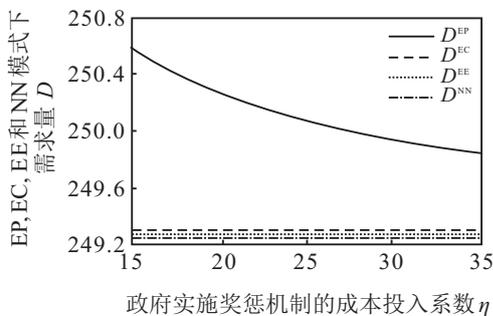


图5  $\eta$ 对NN、EE、EC、EP模式下需求量的影响

由图5可知:与影响节能水平 $\tau$ 情况类似,一方面,随着政府实施奖惩机制的成本投入系数 $\eta$ 的增加,NN、EE、EC及EP模式下需求量 $d$ 都呈下降趋势,但EP模式需求量 $d$ 始终高于其他模式,同样说明EP

模式更优;另一方面,政府通过上述措施来降低奖惩机制的成本投入系数 $\eta$ 提高产品的需求量,提升消费者剩余及福利水平.

### 5 结论

本文考虑由一个制造商主导和一个零售商跟随的绿色供应链,产品销售量受价格及节能水平影响.运用Stackelberg博弈分别构建了NN模式、EE模式、EC模式和EP模式博弈模型,得到了4种模式下的零售价、批发价、产品需求量、节能水平、政府对制造商单位节能水平的奖惩力度以及制造商和零售商利润的均衡解.通过比较分析得到以下主要结论:1) 政府的节能奖惩机制不仅能提高产品节能水平,还可以提升全社会福利水平;2) EP模式在提升全社会福利水平方面优于其他3种模式;3) 政府对制造商单位节能水平的最优奖惩力度与产品市场规模、环境效益系数和节能水平敏感系数正相关,与制造商节能成本投入系数、政府奖惩机制的成本投入系数、制造商单位生产成本和零售商单位销售成本负相关;4) 最优节能水平和需求量与制造商节能成本投入系数、政府奖惩机制的成本投入系数负相关.政府可以通过提高行政管理水平及效率等措施来降低实施奖惩机制的成本投入系数,制造商可以通过转型升级,采用技术更先进、维护成本更低的设施、设备等手段降低节能成本投入系数,提升产品的节能水平和全社会福利水平.

本文尚存在进一步研究的方向.本文考虑的制造商和零售商决策均建立在供应链成员风险中性的前提下,没有考虑到供应链成员风险偏好情形;本文研究的供应链是基于制造商完全垄断的情形,没有考虑制造商竞争的情形.这些都将成为今后进一步研究的方向.

### 参考文献(References)

- [1] Tseng M, Lin Y, Tan K, et al. Using TODIM to evaluate green supply chain practices under uncertainty[J]. Applied Mathematical Modelling, 2014, 38: 2983-2995.
- [2] Zhu W G, He Y J. Green product design in supply chains under competition[J]. European Journal of Operational Research, 2017, 258: 165-180.
- [3] 朱庆华, 窦一杰. 基于政府补贴分析的绿色供应链管理博弈模型[J]. 管理科学学报, 2011, 14(6): 86-95. (Zhu Q H, Dou Y J. A game model for green supply chain management based on government subsidies[J]. Journal of Management Science in China, 2011, 14(6): 86-95.)
- [4] Ghosh D, Shah J. A comparative analysis of greening policies across supply chain structures[J]. International Journal of Production Economics, 2012, 135(2):

- 568-583.
- [5] Pradipta Patra. Distribution of profit in a smart phone supply chain under green sensitive consumer demand[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 192: 608-620.
- [6] Li B, Zhu M Y, Jiang Y S, et al. Pricing policies of a competitive dual-channel green supply chain[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2016, 112: 2029-2042.
- [7] Song H H, Gao X X. Green supply chain game model and analysis under revenue-sharing contract[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 170: 183-192.
- [8] 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 for supply chain with carbon emissions reduction level and price dependent demand[J]. *Control and Decision*, 2016, 31(3): 486-492.)
- [9] Bansal S, Gangopadhyay S. Tax/subsidy policies in the presence of environmentally aware consumers[J]. *Journal of Environmental Economics and Management*, 2003, 45(2): 333-355.
- [10] Sheu J B, Chou Y H, Hu C C. An integrated logistics operational model for green-supply chain management[J]. *Transportation Research, Part E: Logistics and Transportation Review*, 2005, 41(4): 287-313.
- [11] Aksen D, Aras N, Karaarslan A G. Design and analysis of government subsidized collection systems for incentive-dependent returns[J]. *International Journal of Production Economics*, 2009, 119(2): 308-327.
- [12] Sheu J B. Bargaining framework for competitive green supply chains under governmental financial intervention[J]. *Transportation Research, Part E: Logistics and Transportation Review*, 2011, 47(5): 573-592.
- [13] Hong I H, Ke J S. Determining advanced recycling fees and subsidies in "E-scrap" reverse supply chains[J]. *Journal of Environmental Management*, 2011, 92(6): 1495-1502.
- [14] 聂佳佳, 王文宾, 吴庆. 奖惩机制对零售商负责回收闭环供应链的影响[J]. *工业工程与管理*, 2011, 166(2): 52-59.  
(Nie J J, Wang W B, Wu Q. The effects of premium and penalty mechanism on manufacturer take-back closed-loop supply chain[J]. *Industrial Engineering and Management*, 2011, 166(2): 52-59.)
- [15] 易余胤, 梁家密. 奖惩机制下的再制造闭环供应链协调[J]. *计算机集成制造系统*, 2013, 19(4): 841-849.  
(Yi Y Y, Liang J M. Coordination of remanufacturing closed-loop supply chain under premium and penalty mechanism[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2013, 19(4): 841-849.)
- [16] 王文宾, 邓雯雯. 逆向供应链的政府奖惩机制与税收-补贴机制比较研究[J]. *中国管理科学*, 2016, 24(4): 102-110.  
(Wang W B, Deng W W. Comparison between reward-penalty with the tax-subsidy mechanism for reverse supply chains[J]. *Chinese Journal of Management Science*, 2016, 24(4): 102-110.)
- [17] Liu H H, Lei M, Deng H H, et al. A dual channel, quality-based price competition model for the WEEE recycling market with government subsidy[J]. *Omega*, 2016, 59: 290-302.
- [18] Niu B Z, Chen L, Zhang J. Punishing or subsidizing? Regulation analysis of sustainable fashion procurement strategies[J]. *Transportation Research, Part E*, 2017, 107: 81-96.
- [19] 王文宾, 张雨, 范玲玲, 等. 不同政府决策目标下逆向供应链的奖惩机制研究[J]. *中国管理科学*, 2015, 23(7): 68-76.  
(Wang W B, Zhang Y, Fan L L, et al. Research on the premium and penalty mechanism of the reverse supply chain considering various goals of government[J]. *Chinese Journal of Management Science*, 2015, 23(7): 68-76.)
- [20] 范建昌, 倪得兵, 唐小我. 产品责任、责令召回与供应链中的产品质量选择[J]. *管理工程学报*, 2018, 32(4): 101-109.  
(Fan J C, Ni D B, Tang X W. Product liability, mandatory recall and quality choices in supply chains[J]. *Journal of Engineering Management*, 2018, 32(4): 101-109.)
- [21] 孟庆春, 李慧慧. 基于新产消合一考虑链间竞争的供应链价值最大化研究[J]. *中国管理科学*, 2015, 23(3): 168-176.  
(Meng Q C, Li H H. A study on supply chain value maximization considering the competition between supply chains based on new prosumer[J]. *Chinese Journal of Management Science*, 2015, 23(3): 168-176.)
- [22] 刘志, 李帮义, 汪磊, 等. 差异化竞争下考虑再制造专利许可的闭环供应链生产决策[J]. *运筹与管理*, 2018, 27(5): 66-74.  
(Liu Z, Li B Y, Wang L, et al. Closed-loop supply chain production decision considering remanufacturing patent licensing under differentiation competition[J]. *Operation Research and Management Science*, 2018, 27(5): 66-74.)
- [23] Atasu A, Souza G C. How does production recovery affect quality choice[J]. *Production and Operations Management*, 2013, 22(4): 991-1010.

### 作者简介

陈婉婷(1988—), 女, 讲师, 博士生, 从事物流与供应链管理的研究, E-mail: wontingshen@sina.cn;

胡志华(1977—), 男, 教授, 博士生导师, 从事港口物流运作优化等研究, E-mail: zhhu@shmtu.edu.cn;

俞超(1982—), 男, 讲师, 博士生, 从事物流与低碳供应链管理的研究, E-mail: 67927240@qq.com.

(责任编辑: 闫妍)