

doi: 10.3969/j.issn.1007-7375.2019.06.003

# 考虑政府激励政策的绿色供应链博弈模型及 契约协调研究

王新林<sup>1</sup>, 胡盛强<sup>2</sup>, 刘晓斌<sup>3</sup>

(1. 广东工业大学 管理学院, 广东 广州 510520; 2. 广东财经大学 工商管理学院, 广东 广州 510320;  
3. 广东财经大学 国际商学院, 广东 广州 510320)

**摘要:** 研究政府的激励政策对于制造商研发设计绿色产品以及供应链协调机制的影响。通过构建集中决策下的垂直博弈模型、分散决策下制造商领导的Stackelberg博弈模型, 分别得到均衡的绿色度、定价策略以及各组织利润。在此基础上提出了基于收益共享或成本共担契约的供应链协调机制, 得到最优的成本共担与收益共享比例。利用数值分析对上述结论进行验证, 并进行了参数敏感度分析。研究表明, 相比于分散决策, 集中决策下的绿色度更大、零售价更低、供应链整体利润更大。单一的成本共担契约无法实现供应链协调; 对于综合契约协调机制, 收益共享比例与成本共担比例负相关。各组织利润与绿色产品单位补贴调节因子以及绿色度敏感度系数正相关、与价格敏感度系数以及绿色投资系数负相关。

**关键词:** 绿色供应链; 政府激励; 博弈模型; 收益共享契约; 成本共担契约; 优化

**中图分类号:** F272      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1007-7375(2019)06-0017-10

## Green Supply Chain Game Models and Contract Coordination with Government Incentives

WANG Xinlin<sup>1</sup>, HU Shengqiang<sup>2</sup>, LIU Xiaobin<sup>3</sup>

(1. School of Management, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510520, China;  
2. School of Business Administration, Guangdong University of Finance and Economics, Guangzhou 510320, China;  
3. School of International Business, Guangdong University of Finance and Economics, Guangzhou 510320, China)

**Abstract:** For the green supply chain consisting of a manufacturer and a retailer while consumers are sensitive to the price and greenness of green products, an investigation is conducted into how the government's incentive policy affects the manufacturer's decision-making about green products' greenness and supply chain coordination mechanism. A vertical game model under centralized decision-making and manufacturer-led Stackelberg game model under decentralized decision-making is established to get the optimal price, greenness and profits of every organization. Then, cost-sharing or revenue sharing contracts are proposed to coordinate the supply chain. The above conclusions are verified through a numerical analysis and the parameters sensitivity analysis is carried out. The study indicates that: compared with decentralized decision-making, under centralized decision, the greater the green degree is, the lower the retail price is and the higher the overall profits of the supply chain are; and a single cost-sharing contract cannot achieve supply chain coordination; and for the revenue sharing contracts combined with cost sharing, the ratio of revenue sharing is negatively related to the ratio of cost sharing; the profits of each member are positively correlated with the adjustment factors of government subsidies and the coefficient of greenness sensitivity but negatively correlated with coefficients of the price sensitivity and the green investment.

**收稿日期:** 2019-02-18

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(71271060); 教育部人文社会科学研究一般资助项目(17YJC630042); 广东省教育厅人文社科类特色创新资助项目(2017WTSCX043); 广州市哲学社会科学规划资助项目(2016GZQN14, 2018GZQN37); 广东财经大学“创新强校工程”国际科研合作平台“智慧创业研究室”资助项目

**作者简介:** 王新林(1978-), 男, 湖南省人, 博士研究生, 主要研究方向为供应链管理、互联网金融。

**Key words:** green supply chain; government incentives; game model; revenue sharing contract; cost sharing contract; optimization

## 1 文献综述

绿色供应链是一种现代化的管理理念，目标是从物料采购、生产、包装、储存、运输、产品使用及最终报废等产品生命周期全过程都尽可能减少对环境的负面影响及提高资源利用率<sup>[1]</sup>，绿色供应链越来越受到关注。建立绿色供应链，提高资源利用效率，减少制造业对环境的污染，已逐渐成为共识。2017年，国务院办公厅在“关于积极推进供应链创新与应用的指导意见”的文件中指出：大力倡导绿色制造、积极推进绿色流通以及建立逆向物流体系。阿迪达斯采用MMVEA和Eco-Grip技术减少制造过程中材料使用的有害物质，从而减少制造对环境的影响<sup>[2]</sup>。为了提高制造企业研发、设计、制造绿色产品的积极性，政府可为其提供补贴对其进行激励。例如，2017年，东莞市初步设立了“绿色工厂”认定标准，获得认定的企业可以获50~200万元的资金补贴<sup>[3]</sup>。本文的目标之一就是研究政府激励政策对绿色供应链定价及产品绿化水平决策的影响，促进绿色供应链绩效的提升及稳定运行。

当今，绿色供应链不仅成为政府部门和企业界的热门话题，也引起了学术界的关注和研究。关于绿色供应链管理(green supply chain management, GSCM), Srivastava<sup>[1]</sup>从“逆向物流角度”介绍其概念，并从GSCM相关领域的问题背景以及数学方法、工具的应用两个角度对相关文献进行了总结、分类。根据多个国家制造设施的图形和数据，Testa等<sup>[4]</sup>分析了实施GSCM的决定因素和动机。Zhu等<sup>[5]</sup>基于协调理论对GSCM外部和内部实践过程进行评估，得出结论：制造商必须整合内部GSCM实践，并与外部GSCM进行功能协调，以提高其整体绩效和竞争地位。针对由单个制造商和单个零售商构成的绿色供应链，Zhang等<sup>[6]</sup>考虑单位生产成本受成本学习和运营效率低下的共同影响，分别构建了具有前瞻性、反馈性以及短视行为下的博弈模型，推导出均衡结果及成员利润。针对传统零售以及电子直销双渠道环境下绿色产品与非绿色产品供应链之间的竞争问题，Jamali等<sup>[7]</sup>构建了集中决策以及分散决策下的博弈模型，推导出各主体的最优策略。

Swami等<sup>[8]</sup>假定产品的绿色度水平可导致终端需求扩张，提出了两部制契约实现供应链协调。针对市场需求与产品绿色度相关的三级绿色供应链系统，Zhang等<sup>[9]</sup>提出了收益共享机制、Shapley值法协调机制和非对称纳什协商机制。Li等<sup>[10]</sup>考虑将电子商务引入绿色供应链管理，提出了两部制协调契约。Song等<sup>[11]</sup>考虑消费者对绿色产品的敏感度，分别提出了零售商主导的收益共享契约和议价收益共享契约。

以上针对绿色供应链博弈模型及协调契约的研究，都未考虑政府的干预或激励政策。对于政府干预下的绿色供应链博弈模型及协调机制，Yalabik等<sup>[12]</sup>检查消费者、监管和竞争压力对环保生产中企业投资的影响。Sheu等<sup>[13]</sup>构建三阶段博弈模型，分析了政府干预对绿色供应链竞争的影响，结果表明，与没有干预的情况相比，社会福利和供应链利润分别提高了27.8%和306.6%。Ashkan<sup>[14]</sup>为实现政府的财政、社会和环境目标，构建政府能源节约、社会福利和寻求收入政策的数学规划模型，提出了与利益相关者影响程度相适应的干预模式。Seyed等<sup>[15]</sup>讨论了政府财政干预下供应链竞争中的定价政策，绿化战略和治理关税问题。考虑制造成本和需求具有模糊不确定性的情形，Yang等<sup>[16]</sup>构建了3种政府干预下的绿色供应链博弈模型，研究指出政府干预并不总是有利于绿色供应链和制造商。上述研究主要分析政府干预形式、决策类型等对于供应链各成员决策及利润的影响，未考虑契约协调。陈志松<sup>[17]</sup>运用契约理论和纳什谈判理论，构建了政府激励政策下人造板绿色供应链博弈模型，建立了收益共享-成本分担契约协调机制。张红等<sup>[13]</sup>考虑政府补贴政策，建立了企业具有公平偏好的博弈模型，提出了考虑成本共担的收益共享协调机制。

本文针对由单个制造商与单个零售商构成的绿色供应链系统，考虑政府对制造商提供与产品绿色度有关的补贴，构建集中决策以及分散决策下的博弈模型，进而提出收益共享与成本共担综合契约协调机制，最后提出政策建议。文献<sup>[6-7]</sup>考虑绿色产品绿色度对于各渠道需求的影响，但未考虑契约协

调机制; 文献[3, 17]考虑产品绿色度及收益共享契约, 但未考虑政府对于绿色产品制造的干预; 文献[15-16]考虑政府激励政策及产品绿色度对渠道需求的影响, 但未明确给出各种博弈情形下供应链成员决策及利润表达式, 未提出契约协调机制; 文献[3, 17]考虑了政府激励政策, 但政府激励的方式及模型构建的假设条件等与本文差异较大。综上所述, 对于绿色供应链管理, 本文考虑政府的激励政策, 基于集中决策及分散决策下的博弈模型分析各企业的优化策略, 构建基于收益共享或成本共担契约的协调机制, 具有创新性和实践意义, 相关结论可供有关人员参考。

## 2 假设条件及参数设置

1) 研究由单个制造商与单个零售商构成的二级绿色供应链, 制造商确定批发价, 零售商确定零售价。两企业都为风险中性和完全理性。集中决策下, 二者作为整体共同决策。分散决策下, 彼此进行交易及价格竞争, 制造商为主导者、零售商为跟随者, 决策过程为完全信息动态博弈, 即进行Stackelberg博弈。

2) 一般产品和绿色产品在市场上可完全替代。消费者对绿色产品很敏感, 在购买时需要考虑产品的价格和绿色度。参数设置及其定义如表1所示。其中,  $\theta$ 表示绿色度, 即产品绿化水平的高低<sup>[3,11]</sup>。参考相关文献<sup>[3,11]</sup>, 令

$$D = \alpha - \beta p + \gamma \theta. \quad (1)$$

其中,  $\beta > 0, \gamma \geq 0$ , 即绿色产品零售价越低, 绿色度越高, 市场需求越大。

表1 参数设置及其定义

Table 1 Parameters setting and definitions

参数	定义	参数	定义
$p$	绿色产品的零售价	$\theta$	绿色产品绿色度
$\omega$	绿色产品的批发价	$k$	政府针对单位绿色产品提供补贴的调节因子
$c$	绿色产品单位生产成本	$\mu$	绿色投资系数
$\alpha$	绿色产品市场潜在总需求量	$\pi_m$	制造商利润
$D$	绿色产品实际市场需求量	$\pi_r$	零售商利润
$\beta$	消费者对于零售价的敏感度系数	$\pi_m + \pi_r$	分散决策下供应链整体利润
$\gamma$	消费者对于绿色度的敏感度系数	$\pi_{sc}$	集中决策下供应链整体利润

3) 为提高产品绿色度, 制造商需要投入资金用于绿色产品研发设计, 参考Banker等<sup>[18]</sup>的研究, 假定绿色产品研发成本与绿色度具有二次方的关系, 在未进行供应链协调时完全由制造商承担, 即绿色产品研发成本为 $\frac{\mu}{2}\theta^2$ 。其中,  $\mu$ 为足够大的常数, 表示绿色投资系数。

4) 为激励制造商研发、生产绿色产品, 政府对每单位绿色产品给予补贴, 且该补贴与绿色度线性相关, 即绿色度越大, 单位补贴越高。令 $s$ 表示单位补贴, 有 $s = k\theta$ 。其中,  $k$ 表示政府针对单位绿色产品提供补贴的调节因子,  $k \geq 0$ 。上述假设与文献<sup>[19]</sup>的差别在于不考虑绿色度太低时政府对企业的惩罚。

5) 制造商单位生产成本为 $c$ , 销售给零售商的批发价为 $\omega$ , 不考虑零售商的处理成本。为使各企业相关决策、市场需求及利润为正, 有 $p > \omega > c > 0, \alpha > \beta p$  (即无论产品绿色度为多少, 都存在忠实的顾客愿意购买上述产品)。

## 3 模型构建与分析

根据上述假设, 有

$$\pi_m = (\omega - c + k\theta)(\alpha - \beta p + \gamma\theta) - \frac{\mu}{2}\theta^2. \quad (2)$$

$$\pi_r = (p - \omega)(\alpha - \beta p + \gamma\theta). \quad (3)$$

$$\pi_{sc} = (p - c + k\theta)(\alpha - \beta p + \gamma\theta) - \frac{\mu}{2}\theta^2. \quad (4)$$

根据式(2)~式(4), 以下将分析分散及集中决策下的供应链各成员的决策结果、市场需求及利润等 (考虑企业管理实际及便于比较分析, 相关命题都假定各参数取值满足相同的假设条件)。

### 3.1 集中决策下的垂直博弈模型分析

集中决策下的垂直博弈模型对于供应链各企业而言, 是最理想的合作状态。集中决策下, 各个企业作为整体追求供应链利润最大化, 对零售价及绿色度进行决策。根据式(4), 构建集中决策博弈模型。

$$\max_{p, \theta} \pi_{sc} = (p - c + k\theta)(\alpha - \beta p + \gamma\theta) - \frac{\mu}{2}\theta^2. \quad (5)$$

**命题1** 集中决策下, 若满足 $\mu > 2k\gamma$ 且 $\mu > \frac{(\gamma + k\beta)^2}{2\beta}$ , 制造商和零售商作为整体追求利润最大化的相关决策及需求、利润等(用\*表示上标)为

$$\begin{cases} \theta^* = \frac{(\gamma+k\beta)(\alpha-\beta c)}{2\beta\mu-(\gamma+k\beta)^2}, \\ p^* = \frac{\mu(\alpha+\beta c)-(\gamma+k\beta)(k\alpha+\gamma c)}{2\beta\mu-(\gamma+k\beta)^2}, \\ D^* = \frac{\beta\mu(\alpha-\beta c)}{2\beta\mu-(\gamma+k\beta)^2}, \\ \pi_{sc}^* = \frac{\mu(\alpha-\beta c)^2}{2[2\beta\mu-(\gamma+k\beta)^2]}. \end{cases} \quad (6)$$

对 $\pi_{sc}$ 关于 $\theta$ 和 $p$ 求一阶偏导数及二阶偏导数,得到Hesse矩阵,即可证明最优解的存在性及唯一性,令一阶偏导数等于零,即可得到 $\theta$ 和 $p$ 的取值,再代入式(1)及式(4),可得到式(6)。限于篇幅,推导过程略。

### 3.2 分散决策下制造商主导的Stackelberg博弈模型分析

分散决策下,制造商和零售商基于各自利润最大化做出最优决策,决策结果将相互影响。制造商主导的Stackelberg博弈过程分析如下。首先,制造商根据零售商的反应函数确定最优绿色度 $\theta$ 以及批发价 $\omega$ ;然后,零售商根据制造商的决策结果确定最优零售价 $p$ 。构建分散决策博弈模型为

$$\begin{cases} \max_{\theta,\omega} \pi_m = (\omega - c + k\theta)(\alpha - \beta p + \gamma\theta) - \frac{\mu}{2}\theta^2, \\ \text{s.t.} \max_p \pi_r = (p - \omega)(\alpha - \beta p + \gamma\theta). \end{cases} \quad (7)$$

**命题2** 分散决策下,对于制造商主导的Stackelberg博弈模型,若满足 $\mu > 2k\gamma$ 且 $\mu > \frac{(\gamma+k\beta)^2}{2\beta}$ ,则制造商和零售商各自追求利润最大化的相关决策及需求、利润等(用上标d表示)为

$$\begin{cases} \theta^d = \frac{(\gamma+k\beta)(\alpha-\beta c)}{4\beta\mu-(\gamma+k\beta)^2}, \\ \omega^d = \frac{2\mu(\alpha+\beta c)-(\gamma+k\beta)(k\alpha+\gamma c)}{4\beta\mu-(\gamma+k\beta)^2}, \\ D^d = \frac{\beta\mu(\alpha-\beta c)}{4\beta\mu-(\gamma+k\beta)^2}, \\ p^d = \frac{\mu(3\alpha+\beta c)-(\gamma+k\beta)(k\alpha+\gamma c)}{4\beta\mu-(\gamma+k\beta)^2}, \\ \pi_r^d = \frac{\beta\mu^2(\alpha-\beta c)^2}{[4\beta\mu-(\gamma+k\beta)^2]^2}, \\ \pi_m^d = \frac{\mu(\alpha-\beta c)^2}{2[4\beta\mu-(\gamma+k\beta)^2]}. \end{cases} \quad (8)$$

证明过程与命题1类似,限于篇幅,推导过程略。为比较分散及集中决策下绿色产品最优绿色度、价格、市场需求以及各企业利润的大小,提出推论1。

**推论1** 分散及集中决策下绿色产品最优绿色度、最优价格、市场需求以及各企业利润比较为

$$\theta^* > \theta^d, p^* < p^d, D^* > D^d, \pi_{sc}^* > \pi_r^d + \pi_m^d.$$

限于篇幅,对于前3个不等式,证明过程省略。对于利润比较,证明如下。

根据命题1及命题2关于 $\pi_{sc}^*$ 、 $\pi_r^d$ 以及 $\pi_m^d$ 的表达式,有

$$\pi_{sc}^* - (\pi_r^d + \pi_m^d) = \frac{2\beta^2\mu^3(\alpha-\beta c)^2}{[4\beta\mu-(\gamma+k\beta)^2]^2 [2\beta\mu-(\gamma+k\beta)^2]}. \quad (9)$$

由于 $\beta > 0$ ,  $\mu > 0$ ,  $\mu > \frac{(\gamma+k\beta)^2}{2\beta}$ ,有 $\pi_{sc}^* - (\pi_r^d + \pi_m^d) > 0$ ,即 $\pi_{sc}^* > \pi_r^d + \pi_m^d$ 。得证。

相比于分散决策下,集中决策下各企业可通过合作降低产品绿色度及降低零售价,进而提高产品需求量及降低绿色研发成本,供应链整体利润得以提高。由此可知,分散决策下,仅仅依赖批发价契约不能实现供应链协调,其原因在于双重边际效应:制造商希望尽可能提高产品绿色度和批发价,获得更多政府补贴并提高单位绿色产品利润,但也导致其绿色研发成本增加且零售商也不断提高零售价,从而导致产品需求量下降,影响了两企业利润的增加。为提高供应链双方利润,可采取其他协调契约。

### 3.3 基于收益共享或成本共担契约的绿色供应链协调分析

对于二级绿色供应链,分散决策下,为了提高各企业利润,企业之间可通过签订相关契约加强彼此的信任,共同承担风险或共享收益。比如,基于收益共享契约,零售商可考虑将其一部分收益分给制造商,从而让制造商降低批发价,进而零售商降低零售价,达到提高客户需求以及各企业利润的目的。式(10)为收益共享博弈模型,即制造商先确定绿色度和批发价,零售商再确定零售价及收益共享比例(即 $\eta$ )。

$$\begin{cases} \max_{\theta,\omega} \pi_m = (\omega - c + k\theta)(\alpha - \beta p + \gamma\theta) - \frac{\mu}{2}\theta^2 + \\ \quad (1 - \eta)(p - \omega)(\alpha - \beta p + \gamma\theta), \\ \text{s.t.} \max_{p,\eta} \pi_r = \eta(p - \omega)(\alpha - \beta p + \gamma\theta). \end{cases} \quad (10)$$

式(10)中,  $0 \leq \eta \leq 1$ 。根据式(10), 提出命题3。

**命题3** 收益共享契约情形下, 各企业与 $\eta$ 相关的最优决策、市场需求及利润等下标用 $\eta$ 表示为

$$\left\{ \begin{aligned} \theta_\eta &= \frac{(\gamma+k\beta)(\alpha-\beta c)}{2(1+\eta)\beta\mu-(\gamma+k\beta)^2}, \\ \omega_\eta &= \frac{2\mu(\eta\alpha+\beta c)-(\gamma+k\beta)(k\alpha+\gamma c)}{2(1+\eta)\beta\mu-(\gamma+k\beta)^2}, \\ p_\eta &= \frac{\mu((1+2\eta)\alpha+\beta c)-(\gamma+k\beta)(k\alpha+\gamma c)}{2(1+\eta)\beta\mu-(\gamma+k\beta)^2}, \\ D_\eta &= \frac{\beta\mu(\alpha-\beta c)}{2(1+\eta)\beta\mu-(\gamma+k\beta)^2}, \\ \pi_{r\eta} &= \frac{\eta\beta\mu^2(\alpha-\beta c)^2}{[2(1+\eta)\beta\mu-(\gamma+k\beta)^2]^2}, \\ \pi_{m\eta} &= \frac{\mu(\alpha-\beta c)^2}{2[2(1+\eta)\beta\mu-(\gamma+k\beta)^2]}. \end{aligned} \right. \quad (11)$$

命题3证明略。

由命题3可知, 对于 $\pi_{m\eta}$ , 随着 $\eta$ 的增大,  $\pi_{m\eta}$ 不断下降, 当 $\eta=0$ 时,  $\pi_{m\eta}=\pi_{sc}^*$ , 此时 $\pi_{r\eta}=0$ , 即两企业的利润之和达到最大, 但零售商利润为零, 对于零售商不公平。当 $\eta=1$ 时,  $\pi_{m\eta}=\pi_m^d$ ,  $\pi_{r\eta}=\pi_r^d$ , 即制造商利润最小, 但零售商利润未达到最大。为得到零售商关于 $\eta$ 的最大利润, 提出推论2。

**推论2** 收益共享契约下, 当 $\eta^*=1-\frac{(\gamma+k\beta)^2}{2\beta\mu}$ 时, 零售商利润达到最大, 有

$$\left\{ \begin{aligned} \pi_{r\eta^*} &= \frac{\mu(\alpha-\beta c)^2}{8[2\beta\mu-(\gamma+k\beta)^2]}, \\ \pi_{m\eta^*} &= \frac{\mu(\alpha-\beta c)^2}{4[2\beta\mu-(\gamma+k\beta)^2]}. \end{aligned} \right. \quad (12)$$

对 $\pi_{r\eta}$ 关于 $\eta$ 求极大值点, 即可得到 $\eta^*$ , 将 $\eta^*$ 代入 $\pi_{r\eta}$ 和 $\pi_{m\eta}$ , 可得到推论2。证明过程略。

由推论2可知,  $\pi_{m\eta^*}=2\pi_{r\eta^*}$ ,  $\pi_{r\eta^*}>\pi_r^d$ ,  $\pi_{m\eta^*}>\pi_m^d$ , 即收益共享契约尽管不能实现各企业利润之和达到集中决策下的供应链利润, 但当收益共享比例取值恰当时, 各企业可实现利润帕累托改进。

由假设可知, 制造商生产绿色产品时付出了研发设计成本。为了提高双方受益, 可进行成本共担, 即制造商将部分研发设计成本分摊给零售商的同时降低批发价, 零售商进而降低零售价, 从而增加客户需求。

模型构建如下。

$$\left\{ \begin{aligned} \max_{\theta, \omega, \lambda} \pi_m &= (\omega-c+k\theta)(\alpha-\beta p+\gamma\theta)-\frac{\lambda\mu}{2}\theta^2, \\ \text{s.t. } \max_p \pi_r &= (p-\omega)(\alpha-\beta p+\gamma\theta)-\frac{1-\lambda}{2}\mu\theta^2. \end{aligned} \right. \quad (13)$$

式(13)中,  $\lambda$ 为成本共担比例, 为保证决策变量大于零, 有 $\frac{(\gamma+k\beta)^2}{4\beta\mu}<\lambda\leq 1$ 。根据式(13), 提出命题4。

**命题4** 成本共担契约情形下, 各企业与 $\lambda$ 相关的最优决策、市场需求及利润等(下标用 $\lambda$ 表示)为

$$\left\{ \begin{aligned} \theta_\lambda &= \frac{(\gamma+k\beta)(\alpha-\beta c)}{4\lambda\beta\mu-(\gamma+k\beta)^2}, \\ \omega_\lambda &= \frac{2\lambda\mu(\alpha+\beta c)-(\gamma+k\beta)(k\alpha+\gamma c)}{4\lambda\beta\mu-(\gamma+k\beta)^2}, \\ p_\lambda &= \frac{\lambda\mu(3\alpha+\beta c)-(\gamma+k\beta)(k\alpha+\gamma c)}{4\lambda\beta\mu-(\gamma+k\beta)^2}, \\ D_\lambda &= \frac{\beta\lambda\mu(\alpha-\beta c)}{4\lambda\beta\mu-(\gamma+k\beta)^2}, \\ \pi_{r\lambda} &= \frac{\mu[2\beta\lambda^2\mu-(1-\lambda)(\gamma+k\beta)^2](\alpha-\beta c)^2}{2[4\lambda\beta\mu-(\gamma+k\beta)^2]^2}, \\ \pi_{m\lambda} &= \frac{\lambda\mu(\alpha-\beta c)^2}{2[4\lambda\beta\mu-(\gamma+k\beta)^2]}. \end{aligned} \right. \quad (14)$$

命题4推导过程与命题2类似, 证明略。为分析成本共担契约与各企业利润之间的关系, 提出命题5。

**命题5** 成本共担契约情形下, 相比于批发价契约, 不存在成本共担比例使得两企业利润实现帕累托改进。

**证明** 由于 $\lambda$ 由制造商决定, 对 $\pi_{m\lambda}$ 关于 $\lambda$ 求一阶导数, 有

$$\frac{d\pi_{m\lambda}}{d\lambda} = -\frac{\mu(\gamma+k\beta)^2(\alpha-\beta c)^2}{2[4\lambda\beta\mu-(\gamma+k\beta)^2]^2}. \quad (15)$$

根据各参数取值范围, 有 $\frac{d\pi_m^\lambda}{d\lambda}<0$ 。即 $\lambda$ 越小, 制造商利润越大。根据 $\lambda$ 的取值范围, 有

$$\begin{aligned} \lambda &\rightarrow \frac{\pi_{r\lambda}}{\left[\frac{(\gamma+k\beta)^2}{4\beta\mu}\right]^+} \rightarrow -\infty, \\ \pi_{r\lambda}(\lambda=1) &= \frac{\beta\mu^2(\alpha-\beta c)^2}{[4\beta\mu-(\gamma+k\beta)^2]^2} = \pi_r^d. \end{aligned} \quad (16)$$

因此,  $\lambda$ 越小, 对于零售商越不利, 当 $\lambda$ 取最大值1时, 零售商利润与分散决策下的利润相等, 但此时制造商利润相比于分散决策未有增加, 因此不

存在成本共担比例,使得两企业利润可实现帕累托改进。得证。

由命题2至命题4可知,分散决策下,当收益共享比例取值恰当时,基于收益共享契约可实现各企业利润帕累托改进,但对于成本共担契约,无论零售商承担多少比例的研发设计成本,其利润相比于单一的批发价契约都将下降,因此单一的成本共担契约失效。为弥补成本共担契约的不足,进一步提出收益共享与成本共担综合契约:即供应商获得零售商的部分收益、零售商承担供应商的部分研发设计成本。模型构建如下( $\eta$ 为收益共享比例、 $\lambda$ 为成本共担比例)。

$$\begin{cases} \max_{\theta, \omega, \lambda} \pi_m = (\omega - c + k\theta)(\alpha - \beta p + \gamma\theta) - \frac{\lambda}{2}\mu\theta^2 + \\ (1 - \eta)(p - \omega)(\alpha - \beta p + \gamma\theta), \\ \text{s.t. } \max_{p, \eta} \pi_r = \eta(p - \omega)(\alpha - \beta p + \gamma\theta) - \frac{1 - \lambda}{2}\mu\theta^2. \end{cases} \quad (17)$$

式(17)中,  $0 \leq \eta \leq 1$ ,  $0 \leq \lambda \leq 1$ 。制造商根据零售商的反应函数确定最优绿色度和批发价,零售商再根据其反应函数确定零售价。制造商得知其利润函数后确定成本共担比例,零售商根据其利润函数以及成本共担比例确定其收益共享比例。据此,提出命题6。

**命题6** 收益共享与成本共担契约情形下,各企业与 $\eta$ 及 $\lambda$ 相关的最优决策、市场需求及利润为

$$\frac{d\pi_{m\eta\lambda}}{d\eta} = \frac{2\beta\lambda\mu^2(\alpha - \beta c)^2 \left[ \lambda(2\beta\lambda\mu(1 + \eta) - (\gamma + k\beta)^2) - 2(2\beta\lambda^2\mu\eta - (1 - \lambda)(\gamma + k\beta)^2) \right]}{2 \left[ 2(1 + \eta)\beta\lambda\mu - (\gamma + k\beta)^2 \right]^3}. \quad (20)$$

令式(20)等于零,可得到 $\eta^*$ ,由于 $\pi_{m\eta\lambda}$ 关于 $\eta$ 的二阶导数小于零, $\eta^*$ 为极大值点。由于 $0 \leq \eta^* \leq 1$ ,有 $\frac{2}{3} \leq \lambda \leq 1$ 。得证。对 $\eta^*$ 关于 $\lambda$ 求一阶导数,有

$$\frac{d\eta^*}{d\lambda} = -\frac{(4 - 3\lambda)(\gamma + k\beta)^2}{2\lambda^3\beta\mu}. \quad (21)$$

由于 $\frac{2}{3} \leq \lambda \leq 1$ ,有 $\frac{d\eta^*}{d\lambda} < 0$ ,即 $\eta^*$ 与 $\lambda$ 为反向变动关系。结合实际,若制造商承担的绿色产品研发设计成本越大,零售商为了追求更高利润,也愿意将更多的销售收益分配给制造商,即自身获得的销售收益比例越小;反之,若制造商让零售商承担更多研发设计成本,零售商也将给予制造商更少的销售收益。通过收益共享和成本共担比例的此消彼长,实现各企业利润增长。

$$\begin{cases} \theta_{\eta\lambda} = \frac{(\gamma + k\beta)(\alpha - \beta c)}{2(1 + \eta)\lambda\beta\mu - (\gamma + k\beta)^2}, \\ \omega_{\eta\lambda} = \frac{2\lambda\mu(\eta\alpha + \beta c) - (\gamma + k\beta)(k\alpha + \gamma c)}{2(1 + \eta)\lambda\beta\mu - (\gamma + k\beta)^2}, \\ p_{\eta\lambda} = \frac{\lambda\mu[(1 + 2\eta)\alpha + \beta c] - (\gamma + k\beta)(k\alpha + \gamma c)}{2(1 + \eta)\lambda\beta\mu - (\gamma + k\beta)^2}, \\ D_{\eta\lambda} = \frac{\lambda\beta\mu(\alpha - \beta c)}{2(1 + \eta)\lambda\beta\mu - (\gamma + k\beta)^2}, \\ \pi_{m\eta\lambda} = \frac{\mu \left[ 2\eta\beta\lambda^2\mu - (1 - \lambda)(\gamma + k\beta)^2 \right] (\alpha - \beta c)^2}{2 \left[ 2(1 + \eta)\beta\lambda\mu - (\gamma + k\beta)^2 \right]^2}, \\ \pi_{m\eta\lambda} = \frac{\lambda\mu(\alpha - \beta c)^2}{2 \left[ 2(1 + \eta)\lambda\beta\mu - (\gamma + k\beta)^2 \right]}. \end{cases} \quad (18)$$

命题6推导过程与命题2类似,证明略。

由于 $\lambda$ 由制造商决定,对 $\pi_{m\eta\lambda}$ 关于 $\lambda$ 求一阶导数,有

$$\frac{d\pi_{m\eta\lambda}}{d\lambda} = -\frac{\mu(\gamma + k\beta)^2(\alpha - \beta c)^2}{2 \left[ 2(1 + \eta)\lambda\beta\mu - (\gamma + k\beta)^2 \right]^2}. \quad (19)$$

根据各参数范围,有 $\frac{d\pi_{m\eta\lambda}}{d\lambda} < 0$ 。即对于某确定的 $\eta$ 值, $\lambda$ 越小,制造商利润越大。但当 $\eta$ 和 $\lambda$ 都不断变化时,不能判断制造商利润的变化趋势。为得到零售商的最优收益共享比例,提出推论3。

**推论3** 收益共享与成本共担综合契约下,对于某 $\lambda$ 值( $\frac{2}{3} \leq \lambda \leq 1$ ),当 $\eta^* = 1 - \frac{(3\lambda - 2)(\gamma + k\beta)^2}{2\lambda^2\beta\mu}$ 时,零售商利润达到最大。

**证明** 对 $\pi_{m\eta\lambda}$ 关于 $\eta$ 求一阶导数,有

## 4 算例及参数敏感分析

假定生产某绿色产品的由制造商和零售商构成的供应链的相关参数取值为 $\alpha = 2000$ ,  $\beta = 2$ ,  $\gamma = 1$ ,  $c = 100$ ,  $\mu = 10$ ,  $k = 0.5$ 。根据各类命题及推论,得到表2。

由表2可知,相比于分散决策下的批发价契约,集中决策下的最优绿色度更小、零售价更低、市场需求更大、供应链各企业的利润之和更大,验证了推论1。在收益共享契约下,当 $\eta^* = 0.9$ 时,零售商和制造商各自的利润都高于仅考虑批发价契约时的利润。此时,零售商将10%的收益分配给制造商,从而有绿色度提高、批发价和零售价降低,市场需求增加,供应链双方的利润得以提高,验证了

表 2 集中及分散决策下最优绿色度、批发价、零售价、市场需求以及企业利润

Table 2 Optimal greenness, wholesale price, retail price, market demands and profits under centralized and decentralized decision making

决策	$\eta^*$	$\theta$	$\omega$	$p$	$D$	$\pi_r$	$\pi_m$	$\pi_{sc}$
集中决策	—	100	—	550	1 000	—	—	450 000
基于批发价契约的分散决策	—	47	550	787	474	112 188	213 158	325 346
基于收益共享契约的分散决策	0.9	50	525	775	500	112 500	225 000	337 500

推论2。为分析不同协调契约下各企业利润与收益共享或成本共担比例的关系, 根据推论2和命题4, 得到图1。

由图1(a)可知, 收益共享契约下, 随着收益共享比例的增大, 制造商和供应链整体利润不断下降、零售商利润先不断增大, 当收益共享比例超过0.9后, 其利润不断下降。当收益共享比例在0.9至1之间变化时, 制造商和零售商的利润都高于仅考虑批发价契约时的利润, 当收益共享比例为0.9时, 对于两企业而言最有利。由图1(b)可知, 随着 $\lambda$ 的增大, 零售商的利润不断增加, 制造商的利润不断下降, 供应链整体利润先快速上升后缓慢下降, 当 $\lambda = 0.7$ 时, 整体利润达到最大(数值为328 314)。当 $\lambda < 0.3$ 时, 零售商利润为负, 随着 $\lambda$ 的增大, 零售商利润快速增长。显然, 零售商、制造商以及供应链整体获得最大利润时 $\lambda$ 的取值各不相同。无论 $\lambda$ 如何取值, 零售商利润都低于批发价契约下的利润, 验证了命题5。

为分析收益共享与成本共担综合契约下各企业利润与 $\lambda$ 及 $\eta$ 的关系, 根据命题6及推论3, 得到图2。

由图2(a)可知, 当 $\frac{2}{3} \leq \lambda \leq 1$ 时, 随着 $\lambda$ 的增大, 最优收益共享比例 $\eta^*$ 不断下降, 即制造商承担的绿色产品研发设计成本越大, 其获得的销售收益比例

也会越高。由图2(b)可知, 当 $\frac{2}{3} \leq \lambda \leq 1$ 时, 随着 $\lambda$ 的增大、 $\eta^*$ 的下降, 各企业及供应链整体利润都不断增大, 当 $\lambda = 1$ 且 $\eta^* = 0.9$ 时, 各企业及供应链整体利润达到最大。与批发价契约比较可知, 当 $\lambda \geq 0.87$ 时, 零售商的利润高于批发价契约。当 $\frac{2}{3} \leq \lambda \leq 1$ 时, 制造商与供应链整体利润都高于批发价契约。因此, 当 $\lambda \geq 0.87$ 时, 根据推论3中确定的收益共享比例, 基于收益共享与成本共担综合契约, 各企业可实现利润帕累托改进。在利润帕累托改进的前提下, 制造商承担全部研发设计成本时对其最有利, 参数敏感性分析中不再单独考虑成本共担契约(限于篇幅, 仅分析供应链各企业利润与相关参数之间的变化规律, 且每次分析仅改变一个参数的取值)。

1) 政府对于绿色产品单位补贴调节因子以及绿色度敏感度系数对各企业利润的影响。当 $0 \leq k \leq 1.75$ 时(当 $k > 1.75$ 时部分决策变量取值为负, 不符合实际), 得到图3(a)。当 $0 \leq \gamma \leq 4.5$ 时(当 $\gamma > 4.5$ 时部分决策变量取值为负, 不符合实际), 得到图3(b)。

由图3(a)可知, 随着绿色产品单位补贴调节因子的增大, 各类决策情形下各企业的利润增长幅度越来越大。比较而言, 分散决策下, 制造商利润高于零售商, 收益共享下的企业利润之和与仅考虑批

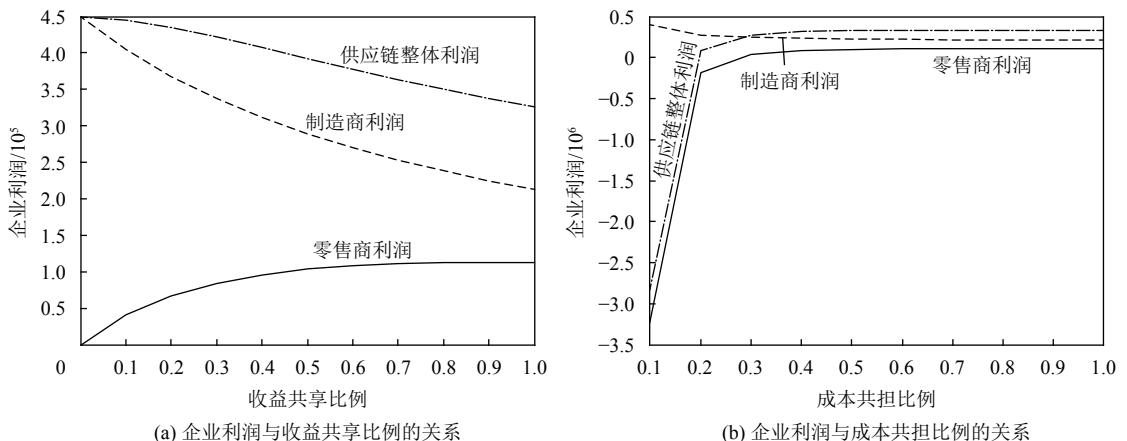


图 1 不同协调契约下各企业利润与收益共享比例或成本共担比例的关系

Figure 1 The relationship about the profits with the revenue sharing ratio or cost sharing ratio under different coordination contracts

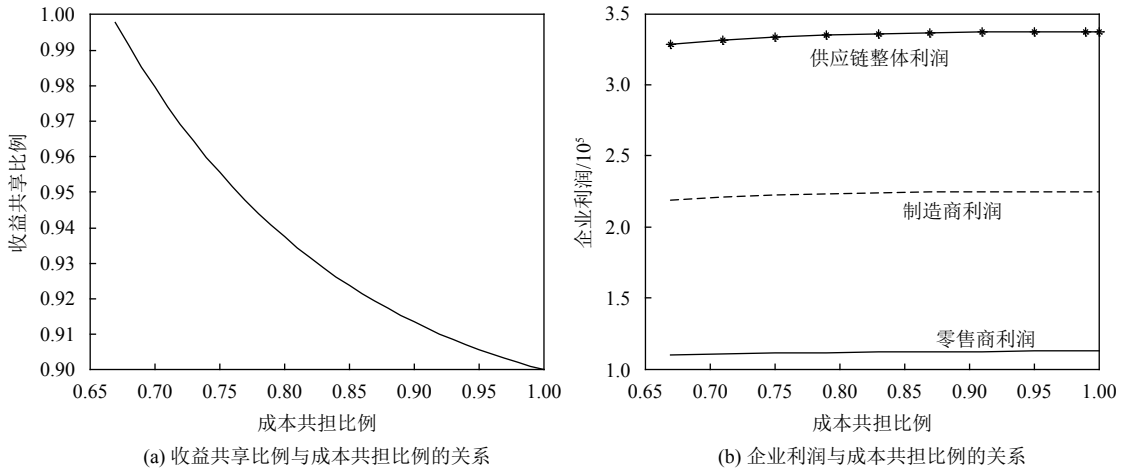


图 2 各企业利润及最优收益共享比例与成本共担比例的关系

Figure 2 The relationship about the profits and the optimal proportion of income sharing with the ratio of cost sharing

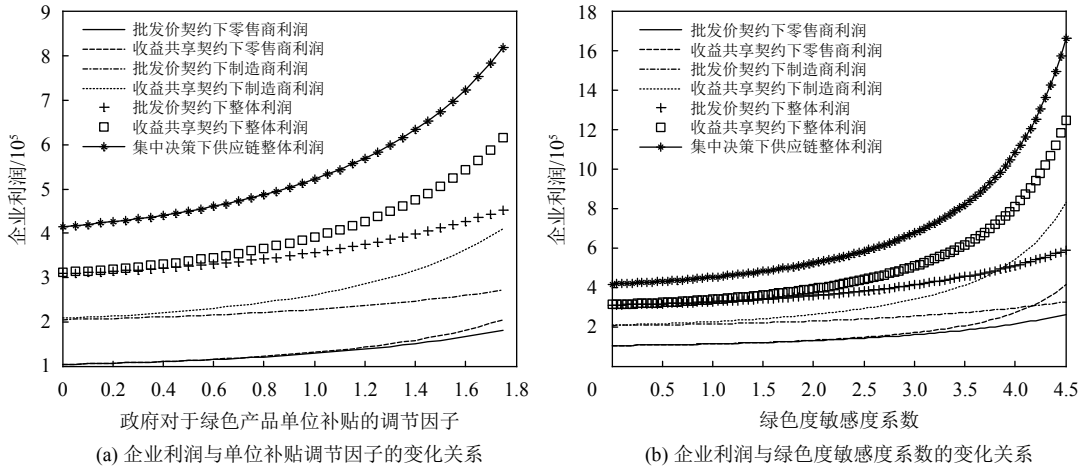


图 3 不同决策情形下各企业利润与政府补贴调节因子及绿色度敏感度系数的变化关系

Figure 3 The relationship about the profits with government subsidy adjustment factor and greenness sensitivity coefficient

发价的企业利润之和差距不断扩大，但都远远低于集中决策下的供应链整体利润。这说明了若政府对提供绿色产品的供应链中的核心企业进行补贴，将刺激消费，进而促进经济的发展、环境的美化以及资源的节约。

由图3(b)可知，随着绿色度敏感度系数的增大，各种决策情形下的企业利润存在着与图4类似的规律，即各企业利润增长的幅度越来越大。图3与图4的不同之处在于：分散决策下，随着 $\gamma$ 的增大，相比于批发价契约，各企业基于收益共享契约获得的利润增长速度更快，当 $\gamma > 4$ 后，收益共享契约下，零售商的利润高于批发价契约下制造商的利润；制造商的利润高于批发价契约下两企业的利润之和。

2) 绿色产品价格敏感度系数以及绿色投资系数对各企业利润的影响。根据相关假设，结合实际，令 $1 \leq \beta \leq 18$ ，得到图4(a)。令 $2 \leq \mu \leq 50$ 时，得到图4(b)。

由图4(a)可知，随着价格敏感度系数的增加，各类决策情形下各企业的利润都不断下降且下降速度很快。当 $\beta$ 大到一定程度后，各种情形下各企业的利润差距很小。分散决策下，相同企业在批发价契约以及收益共享契约下的利润差异很小。随着 $\beta$ 的增大，零售价、绿色度和市场需求都下降较快，导致各企业的利润也快速下降。当 $\beta$ 大到一定程度后，其边际效用递减，对价格及需求的影响较小，各种决策情形下利润下降的空间已较小，因而下降速度比较平稳。

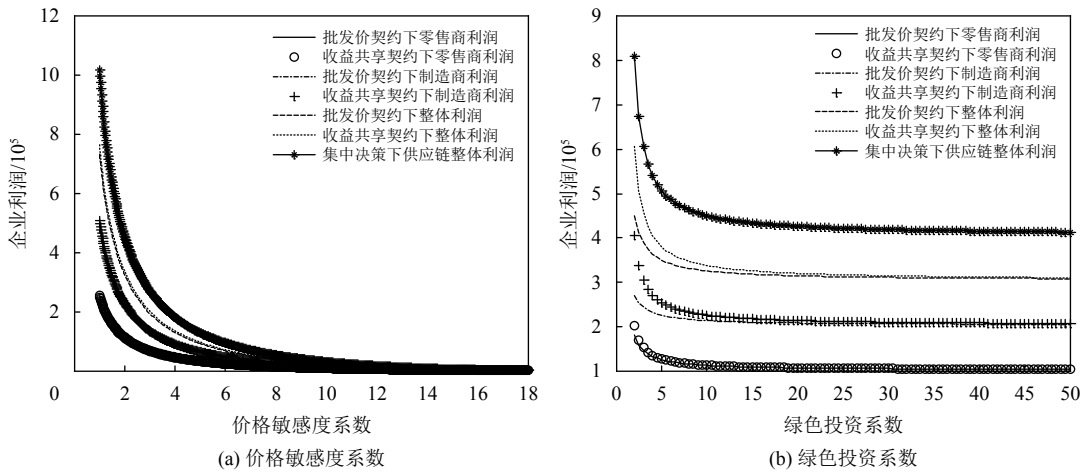


图4 不同决策情形下各企业利润与价格敏感度系数及绿色投资系数的变化关系

Figure 4 The relationship about the profits with the price sensitivity coefficient and green investment coefficient

由图4(b)可知, 随着绿色投资系数的增加, 各种情形下各企业的利润开始下降速度很大, 后平稳下降, 这是由于需求的迅速下降导致各企业利润的快速下跌, 当 $\mu$ 大到一定程度后, 其边际效用递减, 对 $\theta$ 和 $D$ 的影响越来越小, 且零售价几乎保持不变, 各企业利润下降平缓, 且分散决策下相同企业在不同契约下的利润差距越来越小, 但利润之和还是远远小于集中决策下的供应链整体利润。

## 5 结论

对于由制造商与零售商构成的二级绿色供应链, 本文考虑政府对于绿色产品制造提供补贴的激励政策, 分别构建了集中决策以及分散决策博弈模型, 提出了收益共享、成本共担契约协调机制。主要得到如下结论: 单一的成本共担契约无法实现供应链协调; 对于单一的收益共享契约, 存在收益共享比例使得供应链成员实现利润帕累托改进; 对于收益共享与成本共担综合契约, 制造商让零售商承担的研发设计成本越多, 零售商给予制造商的销售收益将越少, 当成本共担比例在一定区间时, 各企业可实现利润帕累托改进。若政府给予制造商的单位绿色产品补贴越多, 除了绿色度的提高以及市场销量的增加外, 也将使得供应链中的企业及消费者都获利, 从而促进经济的发展、环境的美化以及资源的节约。对于绿色投资系数, 其值较大时, 对于各企业决策及利润影响很小, 而将其减小至一定范围时, 各企业利润将增长迅速。当绿色度敏感度系

数增大或价格敏感度系数减小时, 各企业利润增加越来越快。对于本文研究的问题, 还可进行如下扩展: 1) 分析政府与绿色产品激励政策相关的社会福利目标, 从而构建包含政府、制造商、零售商的三级绿色供应链博弈模型。2) 考虑信息不对称、市场需求和价格及绿色度是非线性关系或具有随机性, 构建供应链博弈模型。3) 当绿色供应链构成为单个制造商与多个零售商或者多个制造商与单个零售商, 构建供应链博弈模型。4) 分析其他契约协调方式对于绿色供应链各成员相关决策及利润的影响。

### 参考文献:

[1] SRIVASTAVA S K. Green supply chain management: a state-of-the-art literature review[J]. *International Journal of Management Review*, 2007, 9(1): 53-80.

[2] KUSHWAHA G S, SHARMA N K. Green initiatives: a step towards sustainable development and firm's performance in the automobile industry[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2016, 121(5): 116-129.

[3] 张红, 黄嘉敏, 崔琰琰. 考虑政府补贴下具有公平偏好的绿色供应链博弈模型及契约协调研究[J]. *工业技术经济*, 2018(1): 111-121.

ZHANG Hong, HUANG Jiamin, CUI Yanyan. Game models and contract of green supply chain considering fairness preference and government subsidies[J]. *Journal of Industrial Technological Economics*, 2018(1): 111-121.

[4] TESTA F, IRALDO F. Shadows and lights of GSCM (green supply chain management): determinants and effects of these practices based on a multinational study[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2010, 18(10-11): 953-962.

[5] ZHU Qinghua, SARKIS Joseph, LAI Keehung. Examining the effects of green supply chain management practices and their

- mediations on performance improvements[J]. *International Journal of Production Research*, 2012, 50(5): 1377-1394.
- [6] ZHANG Qiao, TANG Wansheng, ZHANG Jianxiong. Green supply chain performance with cost learning and operational inefficiency effects[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2016, 112(4): 3267-3284.
- [7] JAMALI M B, MORTEZA R B. A game theoretic approach for green and non-green product pricing in chain-to-chain competitive sustainable and regular dual-channel supply chains[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 170(1): 1029-1043.
- [8] SWAMI S, SHAH J. Channel coordination in green supply chain management[J]. *Journal of the Operational Research Society*, 2013, 64(3): 336-351.
- [9] ZHANG Chengtang, LIU Liping. Research on coordination mechanism in three-level green supply chain under non-cooperative game[J]. *Applied Mathematical Modelling*, 2013, 37(5): 3369-3379.
- [10] LI Bo, ZHU Mengyan, JIANG Yushan, et al. Pricing policies of a competitive dual-channel green supply chain[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2016, 112(part 3): 2029-2042.
- [11] SONG Huihui, GAO Xuexian. Green supply chain game model and analysis under revenue-sharing contract[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 170(1): 183-192.
- [12] YALABIK B, FAIRCHILD R J. Customer, regulatory, and competitive pressure as drivers of environmental innovation[J]. *International Journal of Production Economics*, 2011, 131(2): 519-527.
- [13] SHEU Jihbiing, CHEN Yenming. Impact of government financial intervention on competition among green supply chains[J]. *International Journal of Production Economics*, 2012, 138(1): 201-213.
- [14] ASHKAN Hafezalkotob. Direct and indirect intervention schemas of government in the competition between green and non-green supply chains[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 170(1): 753-772.
- [15] SEYED R M, MORTEZA R B. Sustainable supply chain management with pricing, greening and governmental tariffs determining strategies: A game-theoretic approach[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2017, 105(3): 287-298.
- [16] YANG Deyan, XIAO Tiaojun. Pricing and green level decisions of a green supply chain with governmental interventions under fuzzy uncertainties[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 149(4): 1174-1187.
- [17] 陈志松. 政府激励政策下人造板绿色供应链谈判-协调机制研究[J]. *中国管理科学*, 2016, 24(2): 115-124.
- CHEN Zhisong. A bargaining-coordination mechanism for green supply chain of wood-based panel under the government's incentive policy[J]. *Chinese Journal of Management Science*, 2016, 24(2): 115-124.
- [18] BANKER R D, INDER K, SINHA K K. Quality and competition[J]. *Management Science*, 1998, 44(9): 1179-1192.
- [19] ZHU Qinghua, DOU Yijie. A game model for GSC management based on government subsidies[J]. *Journal of Management Sciences in China*, 2011, 14(6): 86-95.

(上接第16页)

- [11] 魏莹, 李锋. 广告和口碑共同作用下的两阶段产品定价问题[J]. *计算机集成制造系统*, 2017, 23(11): 2541-2552.
- WEI Ying, LI Feng. Impact of advertising and word-of-mouth effect on two-stage pricing decisions[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2017, 23(11): 2541-2552.
- [12] FIBICH G. Bass-SIR model for diffusion of new products in social networks[J]. *Physical Review E*, 2016, 94(3): 32305.
- [13] WARD J A. Influence of Luddism on innovation diffusion[J]. *Physical Review E Statistical Nonlinear & Soft Matter Physics*, 2015, 92(1): 1-8.
- [14] WANG G, ZHAO L, HUANG R. 2SI2R rumor spreading model in homogeneous networks[J]. *Physica a Statistical Mechanics & Its Applications*, 2014, 413(11): 153-161.
- [15] TALUKDAR D, SUDHIR K, AINSLIE A. Investigating new product diffusion across products and countries[J]. *Marketing science*, 2002, 21(1): 97-114.